Handbuch
der
Physiologischen Optik
von
H. von Helmholtz.

Dritte Auflage
ergänzt und herausgegeben in Gemeinschaft mit

Prof. Dr. A. Gullstrand und **Prof. Dr. J. von Kries**
Upsala Freiburg
von
Professor Dr. W. Nagel
Rostock

Erster Band
Mit 146 Abbildungen im Text
Einleitung herausgegeben von Prof. Dr. W. Nagel
Die Dioptrik des Auges herausgegeben von Prof. Dr. A. Gullstrand



Hamburg und Leipzig
Verlag von Leopold Voss
1909.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Vorwort zur ersten Auflage.

Die erste Abteilung des vorliegenden Handbuches ist schon im Jahre 1856 erschienen, die zweite 1860, die dritte teils Anfang, teils Ende 1866. Die lange Verzögerung der Herausgabe des letzten Teils war teils durch äußere Gründe, zweimaligen Wechsel des Wohnortes und Wirkungskreises, sich zwischendrängende andere wissenschaftliche Arbeiten, teils durch innere Gründe veranlaßt. Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen ist gerade im Laufe der letzten Jahre sehr vielfältig bearbeitet worden, und hat eben angefangen ihren reichen Inhalt und das tiefgreifende Interesse, was sie besitzt, zu entfalten. Es könnte billigerweise auch jetzt noch einem Zweifel unterliegen, ob es schon möglich ist, mit einiger Aussicht auf Erfolg einen, wenn auch nur vorläufigen, Abschluß eines so jungen und gleichsam noch gärenden Zweiges der Wissenschaft geben zu wollen, wie es doch der allgemeine Plan dieses Buches und der Enzyklopädie, zu der es gehört, erfordert. Andererseits ist bei der eigentümlichen Natur dieses Gebiets ein schneller Fortschritt zu einer endgültigen Beantwortung der noch offenen Fragen nicht gerade zu erwarten. Teils ist dasselbe eng verflochten mit den schwierigsten psychologischen Problemen, teils ist die Zahl der Beobachter gering, die es fördern können, da immer eine lange Übung in der Beobachtung subjektiver Erscheinungen und in Beherrschung der Augenbewegungen vorhergehen muß, ehe man auch nur sieht, was die Vorgänger schon gesehen haben, und mancher, der diese Übungen nicht vorsichtig genug anstellt, schon dann genötigt ist, eine sorgfältige Schonung seiner Augen eintreten zu lassen. Dazu kommt, daß gerade hier, wo psychische Prozesse eingreifen, auch der Spielraum der individuellen Abweichungen viel größer zu sein scheint, als in anderen Gebieten der Physiologie.

Dennoch mußte am Ende der Versuch gemacht werden, Ordnung und Zusammenhang in dieses Gebiet hineinzubringen und es von den auffälligen Widersprüchen zu befreien, die sich bis jetzt durch dasselbe hinzogen. Ich habe dies getan in der Überzeugung, daß Ordnung und Zusammenhang, selbst wenn sie auf ein unhaltbares Prinzip gegründet sein sollten, besser sind als Widersprüche und Zusammenhanglosigkeit. Ich habe deshalb das Prinzip der empiristischen Theorie, wie ich es im 26. und 33. Paragraphen auseinandergesetzt habe, und von dem ich mich immer mehr überzeugt habe, je länger ich arbeitete, daß es das einzige ist, welches ohne Widersprüche durch das Labyrinth der gegenwärtig bekannten Tatsachen hindurchführt, zum Leitfaden genommen. Es sind mir auf diesem Wege schon andere Forscher vorangegangen, deren Arbeiten, vielleicht wegen einer der materialistischen Neigung der Zeit entsprechenden Vorliebe zu unmittelbar mechanischen Erklärungen, im ganzen nicht den Beifall

gefunden haben, den sie wohl verdient hätten. Der Grund davon kann darin gelegen haben, daß diese meine Vorgänger immer nur einzelne Kapitel der Lehre von den Gesichtswahrnehmungen bearbeitet haben, und hier eigentlich nur der Zusammenhang des Ganzen der Ansicht, in welcher er gewonnen wird, überzeugende Kraft verschaffen kann. Ich habe mich deshalb bemüht, diesen Zusammenhang vollständig zu entwickeln.

Den Übelständen, welche durch die Verzögerung der Herausgabe des Ganzen für die ersten beiden Abteilungen entstanden sind, habe ich dadurch abzuhelfen gesucht, daß ich in einem Nachtrage die neuere Literatur zusammengestellt und kurz wenigstens die wichtigsten der seit Herausgabe jener Abteilungen neu gefundenen Tatsachen besprochen habe. Glücklicherweise befindet sich unter diesen keine, welche eine wesentliche Veränderung der aufgestellten Schlüsse und Ansichten bedingt hätte.

Was die literarischen Übersichten betrifft, die nach dem Plane der Enzyklopädie verlangt wurden, so habe ich sie so gut gegeben, als ich bei den mir zu Gebot stehenden Hilfsmitteln konnte. Die neuere Literatur wird ziemlich vollständig sein; die ältere habe ich vielfach aus sekundären Quellen zusammentragen müssen und kann für ihre Genauigkeit keine Garantie übernehmen. Die Ausarbeitung einer wirklich zuverlässigen Geschichte der physiologischen Optik würde eine Arbeit sein, die die Zeit und Kraft eines Forschers für lange Jahre in Anspruch nähme, und das entsprechende Interesse würde sie doch erst haben, wenn der Zustand der Wissenschaft selbst ein reiferer wäre, als er jetzt ist.

Mein Hauptstreben bei der Ausarbeitung des vorliegenden Buches ist es gewesen, mich durch eigenen Augenschein und eigene Erfahrung von der Richtigkeit aller nur einigermaßen wichtigen Tatsachen zu überzeugen. Die Methoden der Beobachtung habe ich stets in derjenigen Ausführungsweise beschrieben, welche mir die zuverlässigste zu sein schien, und wo dieselben von der Methode des Entdeckers abweichen, bitte ich darin nicht eine unmotivierte Sucht nach Neuerungen zu sehen.

Mögen sachverständige Richter die Schwierigkeit und Weitläufigkeit der Aufgabe, die zu lösen war, berücksichtigen, wo sie das ihnen hier übergebene Buch zu tadeln finden sollten.

Heidelberg, im Dezember 1866.

H. Helmholtz.

Vorwort zur dritten Auflage.

Die erste Auflage des Handbuchs der physiologischen Optik von Hermann von Helmholtz, die im Jahre 1866 erschien, ist seit langem vergriffen und auch die zweite Auflage vom Jahre 1885 ist bereits aus dem Buchhandel verschwunden. Die Nachfrage nach dem Werk hat nicht aufgehört und wird noch lange nicht aufhören, denn es gibt keine Neuschöpfung, die uns das Helmholtzsche Werk ersetzen könnte. Die umfassende Fülle des Inhalts zusammen mit der in ihrer klaren Einfachheit so glänzenden Darstellung stempeln die „Physiologische Optik" zu einem wahrhaft klassischen Werk, das seinen Wert auch dann behält, wenn neue Forschungen in dem einen oder dem andren Punkte zu Anschauungen führen, die von den Helmholtzschen abweichen.

Ein solches Werk der wissenschaftlichen Welt und dem Buchhandel zu erhalten, ist nicht nur durch Pietät und historisches Interesse, sondern auch durch praktische Bedürfnisse im höchsten Maße geboten. So habe ich die Mitteilung der Verlagsbuchhandlung, daß sie eine Neuausgabe wünsche und die Aufforderung, eine solche zu übernehmen, mit Freude begrüßt, wenn auch freilich die großen Schwierigkeiten dieses Unternehmens von vornherein keinen Augenblick übersehen werden konnten.

Mit der Herstellung eines bloßen unveränderten Abdruckes des Helmholtzschen Textes (sei es der ersten, sei es der zweiten Auflage) konnten wir uns nicht befreunden. Selbstverständlich wäre ein noch für lange Zeiten wertvolles und nützliches Buch auch auf diese Weise entstanden. Allein bei der Fülle und Bedeutung des neuen Forschungsmaterials versteht es sich, daß der Hinweis auf dieses überall schmerzlich vermißt worden wäre, und daß der Wert des ganzen Werkes wesentlich gesteigert werden konnte, wenn den Fortschritten der Wissenschaft in geeigneter Weise Rechnung getragen wurde. Erschien eine solche Neubearbeitung an Stelle eines bloßen Neudrucks ausführbar, so konnte m. E. auch nur sie als das weit befriedigendere in Frage kommen. Allerdings mußte ich mir sogleich sagen, daß die sachgemäße Bearbeitung des ganzen Werkes vermutlich die Kräfte eines einzelnen, jedenfalls aber die meinigen, überschreiten werde. Diese Schwierigkeit durfte ich als in erwünschter Weise erledigt betrachten, nachdem Herr Professor Gullstrand die Bearbeitung der Dioptrik des Auges, Herr Professor v. Kries diejenige der Gesichtswahrnehmungen übernommen hatte, so daß ich mich, abgesehen von wesentlich technischen Aufgaben, auf die Bearbeitung des zweiten Abschnitts, die Gesichtsempfindungen, beschränken konnte.

Die Hauptschwierigkeit lag, wie selbstverständlich, in der Wahl des Bearbeitungsmodus, und es war von vornherein klar, daß wir nicht hoffen

konnten, allen Wünschen gerecht zu werden. Die Beratungen der Herausgeber untereinander, sowie mit dem Herrn Verleger und Frau ELLEN VON SIEMENS geb. v. HELMHOLTZ, als Vertreterin der Rechtsnachfolger des Autors, haben jedoch auch in dieser Frage bald zu einer Klärung und zu einem bestimmten Ergebnis geführt. Wir waren übereinstimmend der Überzeugung, daß eine völlige Neubearbeitung, die unter freier Benutzung des HELMHOLTZschen Textes ein ganz neues Werk herzustellen hätte, nicht in Frage kommen konnte. Allerdings wäre so und nur so ein einheitliches, formell abgerundetes und somit in jeder Weise leicht benutzbares Werk zu schaffen gewesen. Es wäre dabei aber das, was HELMHOLTZ geschrieben hat, mit der Darstellung des Bearbeiters vollkommen zusammengearbeitet und verschmolzen, daher auch völlig unerkennbar und untrennbar geworden. Ob später einmal eine Bearbeitung dieser Art angezeigt erscheinen wird, darüber mögen zukünftige Zeiten entscheiden. Gegenwärtig — darin stimmten wir überein — ist der Zeitpunkt dafür noch nicht gekommen; noch ist die Bedeutung dessen, was HELMHOLTZ schrieb, zu groß, als daß es zulässig erscheinen könnte, seine Darstellung in der eines Bearbeiters aufgehen und verschwinden zu lassen; noch ist es geboten, gerade die Art, wie HELMHOLTZ die Tatsachen und die Probleme der physiologischen Optik ansah, der allgemeinen Kenntnisnahme zugänglich zu halten.

Aus diesen Überlegungen ergab sich also die Notwendigkeit, den HELMHOLTZschen Text unverändert zum Abdruck zu bringen und die Bearbeitung auf die Form von Hinzufügungen zu beschränken, unter Aufopferung voller Einheitlichkeit des Werkes. Dieser unvermeidliche Übelstand wird sich naturgemäß um so weniger störend bemerkbar machen, je mehr sich die neu hinzuzufügenden Abschnitte im Einklang mit den von HELMHOLTZ geäußerten Anschauungen und Überlegungen befinden, je mehr sie sich also als ein Weiterbauen auf der Basis der HELMHOLTZschen Anschauungen darstellen. In den einzelnen Abschnitten liegen hier die Umstände verschieden. In den theoretisch am meisten umstrittenen Gebieten der Physiologie der Gesichtsempfindungen wie der Gesichtswahrnehmungen lagen nach der Überzeugung der Herausgeber die Verhältnisse insofern günstig, als selbst da, wo eine beträchtliche Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Forschung gegen die Entstehungszeit der ersten Auflage der „physiologischen Optik" zu verzeichnen ist, diese Entwicklung keinerlei gegensätzliches Verhältnis zu den Lehren von HELMHOLTZ in sich schließt. Gerade darin, daß wir in diesen Fragen von denselben grundsätzlichen Anschauungen ausgehen zu müssen glauben, die HELMHOLTZ sich gebildet hatte, liegt das wesentlich bestimmende Moment für unsern Entschluß, die Bearbeitung zu übernehmen. Wie die Dinge hier für die einzelnen Abschnitte sich gestalten, darauf wird sogleich noch zurückzukommen sein.

Nachdem durch diese Erwägungen die Entscheidung für einen Neudruck des HELMHOLTZschen Textes mit Zusätzen gegeben war, erhob sich die Frage, ob der Text der ersten oder der zweiten Auflage zu wählen sei. Allgemeiner Übung nach hätte das letztere als selbstverständlich erscheinen können. Denn mit welchem Rechte konnte der Herausgeber sich anmaßen, irgendwelche vom Autor selbst vorgenommenen Änderungen, Ergänzungen usw. wieder zu beseitigen? Wenn wir uns trotz dieser naheliegenden Erwägung entschlossen haben, den Text der ersten Auflage wieder abzudrucken, so haben uns dabei besondere Gründe geleitet. Erstlich war die ganze unvergängliche Bedeutung,

die HELMHOLTZ für die Physiologie des Sehorgans besitzt, die Heranziehung und Ausbildung feinster physikalischer Methoden, die sorgfältigste Beobachtung der Empfindungen und aller sich an sie knüpfenden psychischen Erscheinungen, die mathematische Durcharbeitung und die philosophisch kritische Erörterung doch im wesentlichen an die erste Auflage geknüpft. Sie ist das klassische Buch, von dem wir eine neue Ära der Sinnesphysiologie datieren dürfen.

Es kommt indessen noch ein anderer Grund hinzu, der uns bestimmte, den Text der ersten Auflage zu bevorzugen. Besondere Umstände haben es mit sich gebracht, daß die Änderungen und Zusätze der zweiten Auflage gegenwärtig in erheblich höherem Maße als der Inhalt der ersten überholt zu nennen sind. Dies liegt nicht etwa daran, daß HELMHOLTZ, als er mit der zweiten Auflage beschäftigt war, durch seine mannigfaltigen anderen Arbeiten abgezogen, für die physiologische Optik nicht mehr das volle Maß von Arbeitskraft, Interesse, oder gar Verständnis gehabt hätte. Im Gegenteil waren gerade damals auf seine Veranlassung und unter seiner Mitwirkung die wichtigen Untersuchungen A. KÖNIGS begonnen worden, denen er das lebhafteste Interesse entgegenbrachte. Allein gerade diese Untersuchungen hatten von einem neu eröffneten Gebiete doch nur einen Teil kennen gelehrt; spätere Weiterführung und Vervollständigung hat ihre Ergebnisse z. T. in einem anderen Lichte erscheinen lassen und eine abweichende Deutung wahrscheinlich gemacht. So war denn, wie wir jetzt wohl sagen dürfen, wegen der Unfertigkeit dieser Untersuchungen gerade der Anfang der 90er Jahre für eine neue Auflage ein besonders ungünstiger Zeitpunkt; und so kommt es andererseits, daß eine gegenwärtige Bearbeitung im allgemeinen leichter und besser an die in der ersten Auflage gelegten Fundamente, als an die in der zweiten versuchten Weiterführungen anknüpfen kann. Allerdings gilt das Gesagte nur von einem Teil der physiologischen Optik; aber es gilt gerade von dem, in welchem überhaupt die zweite Auflage die beträchtlichsten Änderungen gegenüber der ersten aufweist.

So haben wir uns denn für einen genauen Wiederabdruck der ersten Auflage entschieden (unter Einfügung der von HELMHOLTZ selbst dieser Auflage beigegebenen Nachträge). Bezüglich der von den einzelnen Bearbeitern zu liefernden Zusätze erschien es uns richtig, je nach ihrer besonderen Art eine weitgehende Freiheit in formaler Beziehung zu gewähren. Ganz kurze Ergänzungen oder Berichtigungen sind als Fußnoten angefügt, etwas umfangreichere als Anhänge an die einzelnen Paragraphen. In allen drei Hauptabschnitten des Werkes ergab sich jedoch auch die Notwendigkeit, einzelne Gegenstände in ausführlicherer Weise völlig frei zu bearbeiten und die so entstandenen Kapitel teils zwischen die Paragraphen des HELMHOLTZschen Textes einzuschieben, teils an dem Schlusse der Hauptabschnitte anzuhängen. In diesen Zusatzkapiteln haben wir einige von HELMHOLTZ nur kurz oder gar nicht behandelte Gebiete der physiologischen Optik besprochen, die durch neuere Forschungen erst erschlossen worden sind, in anderen Kapiteln kommen neuere theoretische Erwägungen zur Darstellung.

Von einer Neubearbeitung der anatomischen Einleitung glaubte ich absehen zu sollen; zur Orientierung für den nichtspezialistisch gebildeten Leser genügt die HELMHOLTZsche Darstellung in ihrer musterhaft klaren Knappheit, und eine ausführlichere, mehr in die Einzelheiten gehende Bearbeitung würde aus dem Rahmen des Werkes herausfallen.

Von den drei Hauptabschnitten bot der erste, die Dioptrik des Auges, insofern besondere Umstände, als die während der letzten Jahre gewonnene Kenntnis der tatsächlichen Abbildungsverhältnisse in optischen Systemen so erhebliche Abweichungen gegenüber der bisher üblichen Darstellungsweise der Dioptrik mit sich gebracht hat, daß mit kleinen Zusätzen und Änderungen zu dem HELMHOLTZschen Text nicht wohl ein befriedigendes Resultat zu erzielen war, vielmehr eine neue Darstellung großer Gebiete der Dioptrik von den nunmehr gewonnenen Gesichtspunkten aus wünschenswert erschien.

Wenn es sich auch nicht leugnen ließ, daß eine vollständig neue Darstellung des ganzen Gebietes der Dioptrik des Auges aus dieser Ursache erwünscht gewesen wäre, so zeigte es sich auf der anderen Seite bald, daß eine solche Darstellung eine unverhältnismäßige Anschwellung des betreffenden Teiles hätte verursacht und demnach aufzugeben war. Der Bearbeiter dieses Hauptabschnittes ließ sich deshalb angelegen sein, hauptsächlich eine das Wesentliche unserer Kenntnisse enthaltende Darstellung derjenigen Gebiete zu bringen, auf welchen wichtige Fortschritte gemacht worden sind, und diese Darstellung dem in der mathematischen Analyse nicht Bewanderten möglichst zugänglich zu machen. An dem hierbei zum ersten Mal als ein Ganzes in Umrissen hervortretenden Lehrgebäude durften die unbekannt gebliebenen Gesetze der optischen Abbildung in Medien mit variablem Brechungsindex nicht fehlen, umsoweniger, als dieselben teils zur Berechnung eines den nunmehr bekannten Tatsachen entsprechenden schematischen Auges unumgänglich sind, teils aber auch Licht werfen auf die Versuche, die HELMHOLTZsche Theorie der Akkommodation durch eine andere zu ersetzen, und als ohnehin diese Versuche ebensowie die von anderen Autoren gebrachten neuen Stützen der HELMHOLTZschen Theorie zu würdigen waren.

In dem Gebiete der Gesichtsempfindungen galt es vor allen Dingen, Stellung zu der Frage zu nehmen, ob die Vorstellungen, die sich HELMHOLTZ über den Aufbau und die Funktionsweise unseres farbenempfindenden Apparates gebildet hatte, auch für die in den letzten vier Jahrzehnten gemachten neuen Beobachtungen noch eine hinreichende Erklärung zu bieten vermöchten und, wenn nicht, ob sie etwa ganz zu verlassen seien oder endlich, ob uns die Einführung neuer ergänzender Hypothesen nennenswerten Gewinn bringe. Der Herausgeber steht in dieser Frage auf dem Standpunkte, daß keinerlei Anlaß vorliegt, in der Farbentheorie die Grundanschauungen, die HELMHOLTZ vertrat, preiszugeben; wohl reicht die Lehre von der Gliederung des farbenempfindenden Apparates nach drei Komponenten nicht mehr aus, um alle bekannten Tatsachen des Farbensehens in befriedigender Weise zu erklären. In der Lehre von der Duplizität der Netzhautfunktion ist uns indessen der Weg gegeben, die Erscheinungen verständlich zu machen, bei deren Betrachtung die Theorie der Netzhautfunktion in der ursprünglichen HELMHOLTZschen Fassung versagte. Da die Duplizitätstheorie in ihrer Begründung wesentlich an die Verschiedenheiten des Sehens bei starkem und bei schwachem Licht und die sogenannte Adaptation des Auges anknüpft, mußte zunächst diesem Gegenstande ein besonderes Kapitel gewidmet werden, in dem die Abhängigkeit des Lichtsinnes und des Farbensinnes vom Adaptationszustand des Auges behandelt wurde. In einem zweiten Kapitel waren die Fortschritte zu würdigen, welche die Methodik der messenden Untersuchungen über die Farbenempfind-

lichkeit des Auges in den letzten Jahrzehnten gemacht hat (Spektrophotometrie, heterochrome Helligkeitsvergleichung, Peripheriewerte, Flimmerwerte u. a. m.). Das dritte Hauptkapitel behandelt die Farbensinnsstörungen in ihrer Bedeutung für die Farbentheorie.

Was die Gesichtswahrnehmungen anlangt, so wird ihre Auffassung und Darstellung wohl noch für lange Zeit von Überzeugungen abhängen, die durch ein subjektives der Diskussion schwer zugängliches Ermessen bestimmt werden, da es sich hier um eine Reihe von Punkten handelt, die weder dem Experiment noch der direkten Beobachtung zugänglich, sondern durch Erwägungen philosophischer und psychologischer Natur bestimmt werden. Auch die Grundlage, auf die Helmholtz seine Lehre von den Gesichtswahrnehmungen aufbaute, den „Empirismus" in seinem Sinne wird, wie uns scheint, selbst derjenige, der ihm nur in beschränktem Maße zustimmt, ja selbst derjenige, der ihm ganz ablehnend gegenübersteht, als eine Auffassung bezeichnen müssen, die auch gegenwärtig noch möglich, ja im Grunde ebenso berechtigt, durch die nämlichen Tatsachen gestützt, mit den gleichen Schwierigkeiten und Bedenken behaftet ist, wie sie es vor 40 Jahren war. Und wie es Helmholtzs Absicht war, im Jahre 1894 für die zweite Auflage diesen Abschnitt ohne erhebliche Änderungen wieder abzudrucken, so darf man wohl mit Sicherheit sagen, daß auch die seitdem bekannt gewordenen Tatsachen, wenn sie damals schon zu seiner Kenntnis gekommen waren, an diesen seinen prinzipiellen Überzeugungen gewiß nichts geändert haben würden. Unter diesen Umständen hätte es gerade hier wohl zulässig erscheinen können, die Bearbeitung auf eine Anzahl rein tatsächlicher Hinzufügungen zu beschränken, in die Erörterung theoretischer und prinzipieller Frage aber gar nicht einzutreten.

Indessen schon der Wunsch, für eine Reihe von Punkten den gegenwärtigen Stand der Frage darzulegen, dazu noch manche andere, an Ort und Stelle zu erwähnende Gründe ließen eine solche Beschränkung doch als unangängig erscheinen und ergaben für den Herausgeber schließlich die Notwendigkeit, eine allgemeine und selbständige Bearbeitung der fundamentalen, an die Schlagworte des Empirismus und Nativismus geknüpften Probleme zu geben. Außer diesen ist dem dritten Abschnitte noch ein Kapitel hinzugefügt worden, das sich mit den binokularen optischen Instrumenten beschäftigt, ein Gegenstand, der ja ganz im Rahmen des Werkes liegt, in erheblichem Umfange auch schon in der ursprünglichen Helmholtzschen Darstellung berücksichtigt ist, für den aber die umfangreiche und praktisch so bedeutsame neuere Entwicklung der Konstruktionen eine ausführlichere Darstellung wünschenswert machte.

Was nun das Äußere betrifft, in dem sich die neue Auflage präsentiert, so hat es der Herr Verleger sich angelegen sein lassen, dem Werk eine gute Ausstattung zu geben. Es ist ein größeres Format und ein für den Leser angenehmerer Letternsatz gewählt worden. Da auch das Papier stärker als das der früheren Auflagen ist und der Text durch die Zusätze ganz erheblich über den Umfang nicht nur der ersten, sondern auch der zweiten Auflage hinaus vermehrt wurde, erwies es sich als notwendig, eine Teilung des Werkes in drei Bände vorzunehmen, um nicht einen allzu voluminösen Band zu bekommen. Die Teilung in die drei Hauptabschnitte gab dafür die willkommene Grundlage. Die in der ersten Auflage auf Tafeln enthaltenen Abbildungen haben wir, wie es Helmholtz schon in der zweiten Auflage tat, soweit wie möglich in Textfiguren umgewandelt.

Das Literaturverzeichnis, das ARTHUR KÖNIG für die zweite Auflage geliefert hat, haben wir in die neue Auflage nicht übernommen; es hätte jedenfalls bis auf die neueste Zeit fortgesetzt werden müssen, hätte dann aber einen Band für sich gefüllt und der große Aufwand von Zeit und Mühe hätte kaum im richtigen Verhältnis zum Wert der Arbeit gestanden, da wir jetzt über gute periodische Literaturberichte verfügen, besonders über den von A. KÖNIG begründeten und speziell der Sinnesphysiologie gewidmeten in der Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane.

Die Literaturverzeichnisse der ersten Auflage (nebst den in den Nachträgen enthaltenen) haben wir beibehalten, da sie viele Zitate aus alter Zeit enthalten, deren Auffindung sonst auf Schwierigkeiten stößt; in den neuen Zusätzen haben wir die Zitate unter den Text gesetzt.

Um das Zitieren und die Vergleichung mit den beiden früheren Auflagen zu erleichtern, sind über der einzelnen Seite die entsprechenden Seitenzahlen der ersten Auflage angegeben, wie es auch in der zweiten Auflage geschah. In den Zusatzabschnitten, die von den Bearbeitern GULLSTRAND, v. KRIES und NAGEL herrühren, ist dies dadurch zum Ausdruck gebracht, daß an Stelle der Seitenzahlen aus der ersten Auflage ein G., K. oder N. angebracht ist. In gleicher Weise sind die von Bearbeitern herrührenden Anmerkungen unter dem Text gekennzeichnet.

Ein Bild von H. v. HELMHOLTZ wird dem nächsterscheinenden Bande beigegeben werden.

Rostock, im September 1909.

W. Nagel.

Inhaltsverzeichnis.

Anatomische Beschreibung des Auges.

Physiologische Optik.

Erster Abschnitt.

Die Dioptrik des Auges.

Zusätze von A. Gullstrand.

Verzeichnis einiger Abkürzungen,

welche in den Zitaten des HELMHOLTZschen Textes gebraucht sind.

Der Band des betreffenden Werkes ist jedesmal mit römischer Ziffer, die Seite mit arabischer bezeichnet; wo eine Zeitschrift mehrere Serien von Bänden umfaßt, ist die arabische Nummer der Serie, eingeklammert (. . . .), der römischen Zahl des Bandes vorausgesetzt worden.

---

1. Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin. — Berl. Monatsber.
2. Abhandlungen der mathemathisch-physikalischen Klasse der Königl. Bayr. Akademie der Wissenschaften. — Abh. d. Münch. Ak.
3. Abhandlungen der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. — Abh. d. Kön. Ges. zu Göttingen.
4. Göttingische gelehrte Anzeigen unter Aufsicht der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften. — Götting. gel. Anz.
5. Abhandlungen der Leipziger Akademie. — Abh. d. Sächs. Ges. d. Wiss.
6. Berichte der Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. — Leipz. Ber.
7. Annalen der Physik und Chemie, herausgegeben von G. POGGENDORFF. — Pogg. Ann.
8. Journal für reine und angewandte Mathematik, herausgegeben von A. L. CRELLE. — CRELLE's J.
9. Notizen aus dem Gebiete der Natur- und Heilkunde, herausgegeben von FRORIEP und SCHLEIDEN. — Fror. Not.
10. Polytechnisches Journal, herausgegeben von J. G. DINGLER und E. M. DINGLER. — Dingler's pol. J.
11. *Archives des sciences physiques et naturelles par* DE LA RIVE, MARIGNAC *et* PICTET. — *Arch. d. sc. ph. et nat.* oder *Arch. de* GENÈVE.
12. *Philosophical transactions of the Royal Society of London.* — *Phil. Trans.*
13. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh.* — *Edinb. Trans.*
14. *Proceedings of the . . . . meeting of the British Association.* — *Rep. of Brit. Assoc.*
15. *The London, Edinburgh and Dublin philosophical Magazine and Journal of science, conducted by* BREWSTER, TAYLOR, PHILLIPS, KANE. — *Phil. Mag.*
16. *The Edinburgh new philosophical Journal, cond. by* R. JAMESON. — *Eding. J.*
17. *The American Journal of science and arts, cond. by* SILLIMAN, B. SILLIMAN *and* DANA. — *Sillim. J.*
18. *Mémoires présentés à l'Académie Royale de Bruxelles.* — *Mém. de Brux.*
19. *Bulletin de l'Académie Royale des sciences et belles lettres de Bruxelles.* — *Bull. de Brux.*
20. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris.* — *C. R.*
21. *L'Institut, journal universel des sciences et des sociétés savantes en France et à l'étranger.* — *Inst.*
22. *Mémoires de l'Académie des Sciences à Paris.* — *Mém. de Paris.*
23. *Mémoires des savants étrangers, présentés à l'Académie des Sciences à Paris.* — *Mém. d. Sav. étr.*
24. *Annales de chimie et de physique par. MM.* GAY-LUSSAC, ARAGO, CHEVREUL, DUMAS, PELOUZE, BOUSSINGAULT *et* REGNAULT. — *Ann. de ch. et de ph.*

25. *Bulletin de la societé d'encouragement pour l'industrie nationale.* — *Bull. de la Soc. d'enc.*
26. *Bulletin de la classe physico-mathématique de l'Académie impériale des Sciences de St. Pétersbourg.* — *Bull. de St. Pét.*
27. *Mémoires préséntes à l'Académie impériale de St. Pétersbourg.* — *Mém. de Pétersb.*
28. Archiv für Ophthalmologie, herausgegeben von F. Arlt, F. C. Donders und A. v. Graefe. — Arch. f. Ophthalm.
29. Sitzungsberichte der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. — Wien. Ber.
30. *Cosmos, revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des Sciences, redigée par* Moigno. Paris. — *Cosmos.*
31. Archiv für die holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde, herausgegeben von F. C. Donders und W. Berlin. — Arch. für d. holl. Beitr.
32. Nederlandsch Archief voor Genees- en Natuurkunde, uitgegeven door F. C. Donders en W. Koster. — Nederl. Arch.
33. .... Jaarlijksch Verslag betrekkelijk de verpleging en het onderwijs in het Nederlandsch Gasthuis voor Ooglijders. — Jaarl. Versl. in het Nederl. Gasth.
34. Henle und Pfeuffer Zeitschrift für rationelle Medizin. — Henle u. Pfeuffer Zeitschr. oder Zeitschr. f. rat. Med.
35. Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin, herausgegeben früher von J. Müller, jetzt von C. B. Reichert und E. du Bois-Reymond. — J. Müllers Archiv oder Reichert und du Bois Archiv.
36. Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt a. M. — Jahresber. d. Frankf. Ver.
37. *Athenaeum, journal of litterature, science and the fine arts.* — *Athen.*

Anatomische Beschreibung des Auges.

§ 1. Formen des Sehorgans im allgemeinen.

Die Augen der Tiere unterscheiden:

Entweder nur Hell und Dunkel. Dies ist wahrscheinlich bei den sogenannten Augenpunkten der niedersten Tierformen (Ringelwürmer, Eingeweidewürmer, Seesterne, Seeigel, Quallen, Infusionstierchen) der Fall. Ein lichtempfindender Nerv, dessen peripherisches Ende dem Lichte zugänglich unter durchsichtigen Decken liegt, genügt zu diesem Zwecke. Das peripherische Ende des Nerven scheint meistens von verschiedenfarbigem Pigment umgeben zu sein, und verrät sich dadurch dem Beobachter. Doch wissen wir durchaus noch nicht, ob alle pigmentierten sogenannten Augenpunkte der niederen Tierformen wirklich zur Lichtempfindung dienen. Andererseits müssen wir aus der Empfindlichkeit, welche niedere Tiere ohne Augenpunkte für das Licht zeigen, schließen, daß auch lichtempfindende Nerven in durchsichtigen Tieren ohne Pigment vorkommen, die nur der Beobachter in keiner Weise als solche erkennen kann.

Oder die Augen unterscheiden nicht bloß Hell und Dunkel, sondern auch Gestalten. Um das zu können, muß Licht, welches von gesonderten leuchtenden Punkten ausgeht, gesondert, d. h. mittels verschiedener Nervenfasern wahrgenommen werden. Es darf dann nicht mehr jede einzelne Nervenfaser von allen Seiten des Raums her Licht empfangen, sondern nur von einem beschränkten Teile des Raums. Jeder einzelnen Nervenfaser entspricht dann ein gewisses Gesichtsfeld, und es wird in der Wahrnehmung unterschieden werden können, in welchen dieser elementaren Gesichtsfelder leuchtende Körper liegen, in welchen nicht. Je kleiner jedes einzelne Gesichtsfeld ist und je größer ihre Gesamtzahl, desto kleinere Teile der uns umgebenden Körper können unterschieden werden, bis bei der höchsten Vollendung des Gesichtsorgans die einzelnen elementaren Gesichtsfelder gegen das Gesamtgesichtsfeld verschwindend klein werden. Für ein solches Organ können wir die Bedingung des deutlichen Sehens so aussprechen: Licht, welches von einem leuchtenden Punkte der Außenwelt kommt, darf nur auf einen Punkt der lichtempfindenden Nervenmasse (Netzhaut) fallen.

Die Scheidung des Lichts, welches von verschiedenen Seiten des Raums kommt, geschieht

entweder durch trichterförmig gestellte, undurchsichtige Scheidewände (zusammengesetzte Augen der Wirbellosen),

oder durch Brechung des Lichts an gekrümmten brechenden Flächen (einfache Augen der Wirbellosen und Augen der Wirbeltiere).

Die Trennung der Augen, welche nur Licht und Dunkel, und derer, welche auch Gestalten wahrnehmen, ist keine scharfe. Schon bei den niedersten Tierformen bewirken die Pigmentscheiden der lichtempfindenden Nervenfasern, daß Licht nur von der freien Seite auf das Ende der Faser fallen kann, und mit Hilfe von Bewegungen seines Körpers wird ein Tier mit solchen Augenpunkten schon ermitteln können, von welcher Seite das meiste Licht kommt, ebenso wie der Mensch durch sein Hautgefühl die Richtung einstrahlender Wärme wahrnimmt, oder ein Kranker mit vollständig getrübter Kristallinse den Ort der Fenster eines Zimmers ermittelt. In dieser Beziehung haben die Pigmentscheiden der Augenpunkte offenbar einen sehr wesentlichen Nutzen. Wo, wie bei den Blutegeln und Planarien, vor der Nervensubstanz noch ein durchsichtiger kugeliger oder kegelförmiger Körper liegt, können schon verschiedene Teile der Netzhaut von dem aus verschiedenen Richtungen einfallenden Lichte verschieden stark getroffen werden. Von diesen findet ein allmählicher Fortschritt der Ausbildung statt durch die einfachen Augen der Crustaceen, Arachniden und Insekten, welche meist hinter der Hornhaut noch eine Linse und einen Glaskörper unterscheiden lassen, zu denen der Mollusken und namentlich der Kephalopoden, welche letzteren denen der Wirbeltiere schon sehr ähnlich sehen. Da die mikroskopischen Elemente der tierischen Gewebe, namentlich auch die des Nervensystems, in allen Klassen ziemlich gleiche Größe besitzen, und die Genauigkeit des Sehens wesentlich zusammenhängt mit der Menge einzelner empfindender Elemente, die Zahl dieser aber nahehin proportional sein muß der hinteren Oberfläche des Glaskörpers der einfachen Augen, so ist im allgemeinen wohl anzunehmen, daß die Genauigkeit des Sehens dieser Augen ihren linearen Dimensionen direkt proportional ist.

Zusammengesetzte Augen kommen bei Crustaceen vor, wo sie sich oft noch wie ein Aggregat kegelförmig verlängerter einfacher Augen verhalten. Am meisten entwickelt sind sie bei den Insekten. Ihre äußere Oberfläche ist kugelförmig, und nimmt oft mehr als die Hälfte, selbst zwei Drittel einer Kugelfläche ein. Im Zentrum der Kugel liegt eine kolbige Anschwellung des Sehnerven, von welcher aus radial nach allen Seiten Fasern gegen die kegelförmigen und ebenfalls radial gestellten Glaskörper hin auslaufen. Die Basis dieser Glaskörper ist gegen die Hornhaut gewendet, welche in der Regel jedem Kegel entsprechend äußerlich eine ziemlich ebene sechs- oder viereckige Facette darbietet, nach innen aber oft linsenförmige Vorsprünge macht. Die einzelnen durchsichtigen Kegel sind durch trichterförmige Pigmentscheiden, in denen sie stecken, voneinander getrennt. Ich gebe hier die Abbildung (Fig. 1) einer Anzahl solcher Kegel aus dem Auge eines Nachtschmetterlings nach Joh. Müller[1]. Es sind mit *a* die Facetten der Hornhaut bezeichnet, mit *b* die durchsichtigen Kegel, mit *c* die Sehnervenfasern, mit *d* das Pigment zwischen ihnen.

---

[1] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig 1826. S. 349. Taf. VII. Fig. 5.

Wenn zu jedem Kegel sich nur eine Nervenfaser begibt, würde das Gesichtsfeld nur in so viel Teile zerfallen, als Kegel da sind. Doch hat GOTTSCHE[1] neuerdings nachgewiesen, daß an den inneren Enden der Kegel ein optisches Bild der vor dem Auge liegenden Gegenstände entworfen wird, so daß auch in jedem Kegel noch eine Sonderung einzelner Eindrücke stattfinden könnte, wenn mehrere empfindende Nervenelemente da wären. Sollte in jedem Kegel nur ein solches vorhanden sein, so würde die Brechung des Lichts doch dadurch noch nützlich sein, daß das der Achse des Kegels parallel einfallende Licht auf das Ende der Nervenfaser konzentriert und das von anderen benachbarten Punkten des Gesichtsfeldes kommende besser davon abgehalten wird, als es die Scheidewände allein tun würden.

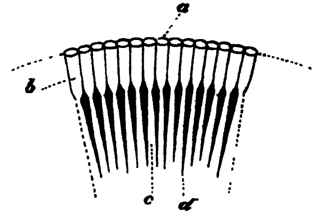


Fig. 1.

Vom Auge des Menschen habe ich in Fig. 2 einen horizontalen Querdurchschnitt abgebildet in fünfmaliger Vergrößerung; das Auge der Wirbeltiere ist

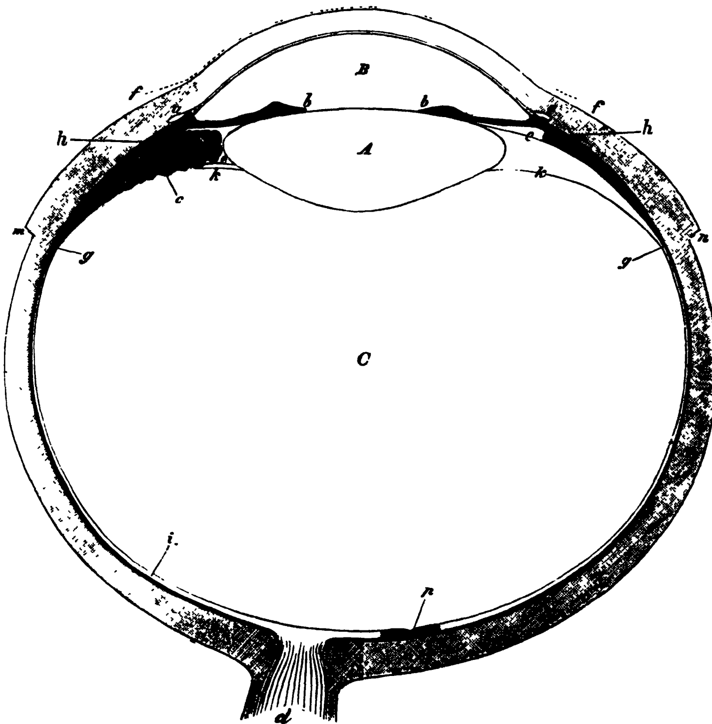


Fig. 2.

dem menschlichen im wesentlichen ähnlich gebaut. Diese Augen schließen folgende durchsichtige Teile ein:

1. die wässrige Feuchtigkeit in der vorderen Augenkammer *B*.
2. die Kristallinse *A*.
3. den Glaskörper *C*.

[1] J. MÜLLERS Archiv für Anat. u. Physiol. 1852. S. 483.

Umschlossen sind diese Teile von drei ineinander liegenden Systemen von Häuten.

1. System der Netzhaut *i* und *Zonula Zinnii e*, schließt zunächst den Glaskörper ein und heftet sich vorn an die Linse *A*.

2. System der *Uvea*, besteht aus der durch einen stärkeren schwarzen Strich angedeuteten Aderhaut (*Chorioidea*) *g*, dem Ciliarkörper *h* und der Regenbogenhaut (*Iris*) *b*. Es umschließt das vorige System mit der Linse und hat nur an der vorderen Seite vor der Linse eine Öffnung, die Pupille.

3. Die feste Kapsel des Augapfels, welche in ihrem größeren hinteren Teile aus der undurchsichtigen weißen Sehnenhaut (*Sclerotica*) und in dem kleineren vorderen aus der durchsichtigen knorpeligen Hornhaut (*Cornea*) gebildet wird. Am lebenden Auge sieht man zwischen den Augenlidern den vorderen Teil der Sehnenhaut (das Weiße) und hinter der durchsichtigen und hervorspringenden Hornhaut die braun- oder blaugefärbte ringförmige Iris, in deren Mitte die Pupille.

Eine Linie, welche durch den Mittelpunkt der Hornhaut und durch den Mittelpunkt des ganzen Auges geht, nennt man die Achse des Auges, weil das Auge wenigstens annähernd einem Rotationskörper mit dieser Achse entspricht. Eine darauf senkrechte Ebene, welche durch die größte Weite des Augapfels geht, nennt man dagegen Äquatorialebene.

Ich werde im folgenden eine Beschreibung der einzelnen Teile des Auges geben, dabei aber natürlich nur so weit in Einzelheiten gehen, als es für das Verständnis der Funktionen des Auges notwendig ist.

Für die vergleichende Anatomie und Physiologie des Sehorgans sind die Hauptwerke:

J. Müller, Zur Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig 1826. S. 315.
R. Wagner, Lehrbuch der vergleichenden Anatomie. 1835.
J. Müller, Handbuch der Physiologie des Menschen. Coblenz 1840. Bd. II, S. 305.
R. Wagner, Lehrbuch der speziellen Physiologie. 1843. S. 383.
v. Siebold und Stannius, Lehrbuch der vergleichenden Anatomie. Berlin 1848.
Bergmann und Leuckart, Anatomisch-physiologische Übersicht des Tierreichs. Stuttgart 1852.

Als allgemeine Lehrbücher für den Bau des menschlichen Auges:

Th. Sömmering, Abbildungen des menschlichen Auges. Frankfurt a. M. 1801. — Lateinisch ebenda.
C. F. Th. Krause, Handbuch der menschlichen Anatomie. Hannover 1842. Bd. I, T. II. S. 511—551. — Die ältere Literatur der Anatomie des Auges ebenda. S. 733—745.
E. Brücke, Anatomische Beschreibung des menschlichen Augapfels. Berlin 1847.
W. Bowman, *Lectures on the parts concerned in the operations on the eye and on the structure of the retina and the vitreous humour.* London 1849.
A. Kölliker, Mikroskopische Anatomie oder Gewebelehre des Menschen. Leipzig 1854. Bd II, S. 605. — Neuere Literatur ebenda. S. 734—736.
Dujardin, *Remarques sur certaines dispositions de l'appareil de la vision chez les insectes.* C. R. XLII, 941. Inst. 1856, 194.

§ 2. Sehnenhaut und Hornhaut.

Die Sehnenhaut des Auges (*σκληρὸν, tunica albuginea, sclerotica, dura*, harte Haut) umschließt den größeren Teil des Augapfels, bedingt seine Gestalt und schützt ihn vor äußeren Einwirkungen. Ihre äußere Form weicht merklich von der einer Kugel ab; ihre hintere Seite ist nämlich abgeplattet, und im Äquator wird sie oben und unten, rechts und links durch den Druck der geraden Augenmuskeln etwas eingedrückt, während sie sich zwischen diesen

Stellen stärker hervorwölbt. Der größte Durchmesser liegt bei den meisten Individuen von der Nasenseite und oben nach der Schläfenseite und unten. Vorn nimmt die Sehnenhaut die stärker gewölbte Hornhaut in sich auf, hinten und etwas nach der Nase herüber ist sie durchbohrt, um den Sehnerven (*Nervus opticus*) Fig. 2 *d* eintreten zu lassen, und geht hier in dessen sehnigen Überzug über. Die Sehnenhaut ist hinten und vorn dicker als in dem Äquator des Auges, wie dies die Figur zeigt. Die vordere Verdickung wird dadurch bedingt, daß die Sehnen der Augenmuskeln sich an die Sehnenhaut anlegen und mit ihr verschmelzen. Bei *m* ist der Ansatzpunkt des inneren, bei *n* der des äußeren geraden Augenmuskels.

Das Gewebe der Sehnenhaut ist Sehnengewebe; es ist weiß, wenig durchscheinend, biegsam, fast unausdehnbar. Seiner chemischen Beschaffenheit nach gehört es zu den leimgebenden Stoffen. Mikroskopisch besteht es aus einem äußerst dichten und straffen Geflechte von Bindegewebsfasern, welche meist der Oberfläche parallel verlaufen, und daher eine unvollkommene Spaltbarkeit der Haut in Lamellen zulassen. Dazwischen liegt, wie in anderen Sehnen, ein Netzwerk äußerst feiner elastischer Fasern, welche an den Stellen, wo sich ursprünglich ihre Bildungszellen befanden, Verdickungen mit Kernrudimenten zeigen.

Die Hornhaut ist vorn in die Sehnenhaut eingesetzt, und hat im allgemeinen die Form eines starkgekrümmten Uhrglases. Ihre vordere Fläche schließt sich ziemlich nahe einem Abschnitte eines Rotationsellipsoides an, welches um seine längere Achse gedreht ist. Das Ende dieser Achse liegt in dem Mittelpunkte der Hornhaut. Die Form der hinteren Fläche ist nicht sicher bekannt. Bei Erwachsenen ist die Hornhaut in der Mitte etwas dünner als am Rande.

Die Hornhaut besteht aus folgenden Schichten von außen nach innen:

1. Ein Epithelium, aus geschichteten platten Zellen von Hornsubstanz gebildet (Pflasterepithelium), in der Figur angedeutet durch die gebrochene Linie *ff*. Es setzt sich auf die Bindehaut der Augenlider fort. Die vordere Fläche dieses Epitheliums wird durch die fortdauernd zufließende Tränenfeuchtigkeit feucht und glatt erhalten.

2. Die faserige Schicht der Hornhaut (*Substantia propria corneae*) ist die mächtigste von allen, in der Figur weiß gelassen. Sie gehört nach ihrer chemischen Zusammensetzung den Knorpeln an, indem sie beim Kochen Chondrin gibt. Sie besteht aus einem ähnlichen Gewebe von Fasern wie die Sehnenhaut, nur sind die Fasern zu platten Bündeln vereinigt, deren Fläche der Oberfläche der Hornhaut parallel läuft, daher auch die Hornhaut sich unvollkommen in Schichten trennen läßt. Beim Erwachsenen enthält die Hornhaut keine blutführenden Gefäße, wohl aber zwischen den Faserbündeln ein System verästelter kernhaltiger Zellen, wie sie als unentwickeltes elastisches Gewebe in manchen bindegewebigen Organen sich finden, und vielleicht unterhalten diese den zur Ernährung der Hornhaut nötigen Austausch von Flüssigkeiten durch die Substanz hin. Die Substanz der Hornhaut erscheint bei der gewöhnlichen Beleuchtung vollkommen durchsichtig. Konzentriert man aber viel Licht durch eine Sammellinse auf einen Punkt der Hornhaut, so erscheint sie trüb, indem nun das von den Grenzflächen ihrer mikroskopischen Elemente zurückgeworfene Licht reichlich genug wird, um wahrgenommen zu werden.

3. Die Descemetsche Haut (Wasserhaut, glasartige Lamelle der Hornhaut, auch *Membrana Demoursii*) ist eine strukturlose, durchsichtige, brüchige Membran von 0,007 mm bis 0,015 mm Dicke. Wenn man sie von der

Hornhaut trennt, rollt sie sich auf. Sie schließt sich durch ihre Resistenz gegen kochendes Wasser, Säuren und Alkalien dem elastischen Gewebe an. Auf ihrer der wässrigen Feuchtigkeit zugewendeten Fläche trägt sie eine Schicht großer polygonaler Epithelialzellen, welche durch die punktierte Linie auf der inneren Seite der Hornhaut angedeutet ist.

Die Grenzfläche zwischen Hornhaut und Sehnenhaut ist nicht senkrecht gegen die Oberfläche des Augapfels, sondern außen greift die Sehnenhaut, innen die Hornhaut weiter über. Auf der inneren Fläche ist die Grenze der Hornhaut ein ziemlich regelmäßiger Kreis, von außen erscheint die Hornhaut dagegen queroval, weil oben und unten die Sehnenhaut etwas mehr übergreift, als an den Seiten. Die Fasern der Hornhaut gehen an dieser Grenze unmittelbar in die der Sehnenhaut über.

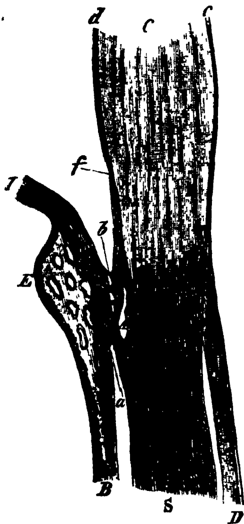


Fig. 3.

Eigentümlich verhält sich dagegen die DESCEMETsche Haut an der Grenze der Hornhaut. In Fig. 3 ist ein Querschnitt dieser Gegend dargestellt. Darin ist *S* die Sehnenhaut, *C* die Hornhaut, *c* ihr äußeres Epithelium, welches auf die Bindehaut *D* übergeht, *d* die DESCEMETsche Haut. Von *f* ab entspringt zwischen dieser und der Substanz der Hornhaut ein Netzwerk elastischer Fasern, während die DESCEMETsche Haut selbst mit einem zugeschärften Rande zu enden scheint. Indem sich die Schicht elastischer Fasern von der Sehnenhaut trennt, und weiter hinten sich an eine Lamelle *a* derselben ansetzt, entsteht hier an der Grenze zwischen Sehnenhaut und Hornhaut ein ringförmiger Kanal, der SCHLEMMsche Kanal. Nach außen ist derselbe von der Sehnenhaut begrenzt, seine innere Wand besteht dagegen vorn aus elastischem Gewebe, hinten aus Sehnengewebe. An dieser inneren Wand sind die muskulösen Teile der Uvea befestigt. Der genannte Kanal scheint Blut zu führen.

Die Messungen der Dimensionen des Auges sind für die physiologische Optik von der größten Wichtigkeit, aber meist mit vielen Schwierigkeiten verbunden, weil die Gestalt des ganzen Augapfels und seiner einzelnen Teile einmal bei verschiedenen Augen außerordentlich verschieden ist, und zweitens nach dem Tode den mannigfachsten Veränderungen unterliegt. Die individuellen Verschiedenheiten sind so groß. daß man Mittelwerte aus Beobachtungen verschiedener Augen nur mit großer Vorsicht anwenden darf. Wo es auf genaue und sichere Resultate ankommt, müssen alle wichtigeren Größen durchaus an demselben Auge gemessen sein.

Was zunächst die äußere Form des Augapfels anlangt, so hängt dieselbe vom Druck der Flüssigkeiten ab, die er einschließt. Unmittelbar nach dem Tode entleert sich ein großer Teil seiner Blutgefäße, wobei sich der Druck natürlich verringert; dann vermindert sich allmählich die innere Flüssigkeitsmenge auf endosmotischem Wege noch mehr, so daß der Augapfel schlaff wird, und die Häute, namentlich die Hornhaut, sich falten. Messungen über die Form des Augapfels müssen daher entweder an sehr frischen Augen angestellt werden, oder man muß, wie BRÜCKE[1], den Druck künstlich wiederherstellen, indem man durch den Sehnerven eine Kanüle einstößt und diese mit einer senkrechten, eine Wassersäule von etwa 0,4 m enthalten-

[1] E. BRÜCKE, Anat. Beschreibung des menschl. Augapfels. Berlin 1847. S. 4.

den Röhre in Verbindung bringt. Diese Methode genügt, um die verschiedenen Durchmesser des Augapfels zu messen. Aber für eines der wichtigsten optischen Elemente des Auges, die Hornhautkrümmung, genügt es nicht, den Druck nur annähernd herzustellen. Der Krümmungsradius des Scheitels der Hornhaut wird, wie ich durch eine unten beschriebene Messungsmethode gefunden habe, desto größer, je größer der Druck. Der Grund hiervon ist wohl darin zu suchen, daß eine membranöse Hülle, welche Flüssigkeit umschließt, sich desto mehr der Form einer Kugel nähern muß, je größer der Druck der Flüssigkeit ist, weil die Kugel unter den Körpern mit gleich großer Oberfläche das größte Volumen hat. Wenn dies beim Auge eintritt, wird namentlich die einspringende Rinne zwischen Hornhaut und Sehnenhaut herausgedrängt werden müssen, und dadurch die Hornhaut weniger gewölbt werden.

Unter diesen Umständen ist es offenbar ein wesentliches Bedürfnis, daß so viel als möglich alle wichtigeren Größenverhältnisse des Augapfels an lebenden Augen bestimmt werden.

Die älteren Messungen des Auges sind meist nur mit dem Zirkel ausgeführt. C. Krause, welcher ein sehr ausgedehntes System von Messungen ausgeführt hat, hat die äußeren Dimensionen des Auges mit dem Zirkel abgemessen, dann hat er die Augen, nachdem er sich die Schnittlinie vorher bezeichnet hatte, halbiert, und zwar Hornhaut, Iris und Linse durch einen Schnitt des Rasiermessers, die Sehnenhaut mit der Schere, die Hälften dann in ein Schälchen voll Eiweißlösung gelegt, so daß die Schnittfläche sich dicht unter der Oberfläche der Flüssigkeit befand. So maß er die Dimensionen des Querschnitts teils mit dem Zirkel, teils mit einem gegitterten Glasmikrometer im Okulare eines schwach vergrößernden Mikroskops, teils mit einem quadratischen Drahtnetze, welches auf die Oberfläche der Flüssigkeit gelegt wurde. Er hatte vielfach Gelegenheit, sehr frische Augen anzuwenden; bei diesen können die äußeren Messungen der Sclerotica als hinreichend zuverlässig angesehen werden, die Wölbung der Hornhaut, deren Größe vom Drucke der Flüssigkeiten abhängt, ist aber wohl an den durchschnittenen Augen beträchtlich verändert gewesen.

Ich gebe hier Krauses Tafel für die Form von 8 Augäpfeln. Es ist Nr. I von einem 30jährigen ertrunkenen Manne, Nr. II das rechte Auge eines 60jährigen Mannes, durch einen Schnitt in den Hals getötet, Nr. III und IV das linke und rechte Auge eines 40jährigen Mannes, erhängt, Nr. V und VI das linke und rechte Auge eines 29jährigen, Nr. VII und VIII dieselben eines 21jährigen Mannes, die beiden letzten mit dem Schwerte hingerichtet. Die Maße sind in Pariser Linien* angegeben.

Nr.	Achse des Auges		Durchmesser					
			transversal	senkrechter		diagonaler großer		kleiner
	äußere	innere		äußerer	innerer	äußerer	innerer	
I.	10,9	9,85	10,9	10,8	9,9	11,25	10,3	
II.	11,05	10,0		10,3	9,4	11,1	10,2	11,05
III.	10,7	9,8	10,7	10,5	9,6	11	10,2	10,6
IV.	10,5	9,5	10,6	10,3	9,5	10,9	10,1	10,7
V.	10,8	9,55	10,9	10,55	9,6	11,3	10,35	11
VI.	10,8	9,55	11	10,6	9,45	11,3	10,2	11,1
VII.	10,65	9,4	10,75	10,3	9,45	10,75	9,6	10,75
VIII.	10,65	9,45	10,75	10,3	9,15	10,9	9,75	10,7

Brücke hat Messungen an Augen angestellt, welche durch einen Wasserdruck von 4 Dezimeter gespannt waren, und gibt an, daß die Achse des Augapfels zwischen 23 und 26 mm betrage, der größte horizontale Durchmesser zwischen 22,8 und 26 mm, der größte vertikale zwischen 21,5 und 25 mm.

* 1 Pariser Linie = 2,2558 mm. N.

C. Krause vergleicht die innere Wölbung der Sclerotica mit der Fläche eines Rotationsellipsoides; die Achsen, welche er berechnet hat, und seine Angaben über die Dicke der Hornhaut und Sclerotica an verschiedenen Stellen führe ich hier noch an.

Nr.	Dicke der Sehnenhaut			Halbe Achsen des Ellipsoides der inneren Wölbung		Dicke der Hornhaut	
	in der Augenachse	am Äquator	am vorderen Rande	große	kleine	Mitte	Rand
I.	0,55	0,45	0,35	5,12	4,45	0,4	0,5
II.	0,5	0,35		5,05	4,15	0,35	0,5
{III.	0,45	0,4	0,35	5,12	4,23	0,4	0,5
VI.	0,5	0,4	0,3	5,07	4,41	0,4	0,45
{V.	0,65	0,4	0,3	5,14	4,58	0,5	0,55
VI.	0,65	0,5	0,3	5,05	4,43	0,48	0,55
{VII.	0,55	0,5	0,4	5,05	4,41	0,53	0,63
VIII.	0,6	0,5	0,4	4,93	4,19	0,5	0,62

Die Messungen von C. Krause über die Form der Hornhaut übergehe ich hier, weil deren Methode für ein so wichtiges Element nicht zuverlässig genug erscheint. Ich bemerke nur, daß er die vordere Wölbung der Hornhaut für eine Kugelfläche, die hintere für den Scheitel eines Rotationsparaboloides erklärt. Betreffs der Dicke fand ich an einigen Hornhäuten, die ich untersuchte, daß die Dicke in den mittleren zwei Vierteln des Querschnitts fast konstant war, und erst gegen den Rand hin schnell zunahm, so daß in der Mitte die Krümmungskreise der beiden Flächen nahe konzentrisch zu sein scheinen.

Kohlrausch hat an lebenden Augen den Krümmungsradius der Hornhaut dadurch zu messen gesucht, daß er die Größe der Spiegelbilder auf der Hornhaut bestimmte. Der, dessen Auge untersucht werden sollte, saß auf einem sehr massiven Stuhle mit hoher Lehne. Sein Kopf wurde durch eine besondere Vorrichtung gehalten, wodurch es ihm leicht wurde, vollkommen ruhig zu sitzen. Er fixiert einen kleinen weißen Punkt, der auf dem Mittelpunkte des Objektivs eines auf 2 bis 3 Fuß Entfernung zu gebrauchenden Keplerschen Fernrohrs angebracht ist. Das Fernrohr ist auf das Auge gerichtet, und zwar so, daß der besagte weiße Punkt in derselben Horizontalebene mit dem Mittelpunkte der Hornhaut liegt. In dem Brennpunkte des Okulars sind zwei Spinnfäden parallel gespannt, welche, ohne ihren Parallelismus zu verlieren, durch Schraubenbewegung einander genähert werden können. Auf jeder Seite, wieder in derselben Horizontalebene, steht ein Licht, dessen Schein durch eine runde Öffnung in einem kleinen Schirme auf das Auge fällt und von diesem reflektiert wird, so daß im Fernrohre zwei kleine Bilder der leuchtenden Punkte erscheinen. Nachdem die Spinnfäden auf diese genau gerichtet sind, wird an die Stelle des Auges ein wohlgeteilter Maßstab gebracht, und auf diesem die Entfernung der spiegelnden Stellen der Hornhaut abgelesen. Aus dieser Entfernung, aus dem Abstande des Auges von den Öffnungen in den Lichtschirmen und dem Mittelpunkte des Objektivs, und endlich aus der Entfernung der letztgenannten Punkte voneinander wurde der Radius der Hornhaut annäherungsweise berechnet.

Kohlrausch fand aus Messungen an 12 Augen im Mittel 3,495 Par. Lin. (7,87 mm), als kleinsten Wert 3,35, als größten 3,62, und berechnet den wahrscheinlichen Fehler der einzelnen Bestimmungen auf 0,02.

Senff hat nach einer ähnlichen, aber nicht genauer beschriebenen Methode nicht bloß die Krümmungshalbmesser, sondern auch die Elliptizität der Hornhaut bestimmt und gibt folgende Resultate an:

	Krümmungshalbmesser im Scheitel	Quadrat der Exzentrizität	Große Achse	Kleine Achse	α
Rechtes Auge. Vertikal	7,796	0,1753	9,452	8,583	3,6°
Rechtes Auge. Horizontal	7,794	0,2581	10,435	9,019	2,9°
Linkes Auge. Vertikal	7,746	0,4492	11,243	8,344	1,6°

Den Winkel α nennt SENFF den Winkel zwischen dem Scheitel der Ellipse und dem Endpunkte der Augenachse. Jener liegt von diesem in den vertikalen Durchschnitten nach unten, in dem horizontalen nach außen. Wahrscheinlich versteht SENFF hier unter Augenachse dasselbe, was wir später als Gesichtslinie definieren werden.

Die größte Schwierigkeit bei diesen Messungen ist die, das Auge und den Kopf des Untersuchten gehörig zu befestigen. Bei einer jeden Messungsmethode der Bilder, wobei man erst abzulesen hat, mit welchem Teilstriche der gewählten Skale der eine Rand des Hornhautbildes, und dann, mit welchem der andere zusammentrifft, wird jede kleinste Verschiebung des Kopfes zwischen den beiden Ablesungen zur Größe des Bildes addiert oder davon subtrahiert werden. Ich habe deshalb ein Meßinstrument konstruiert, welches diese und andere Messungen am Auge genau auszuführen erlaubt, ungestört durch die kleinen Schwankungen des Kopfes, und es eben deshalb Ophthalmometer genannt, obgleich es auch zu einer großen Menge anderer Messungen, namentlich zu Messungen optischer Bilder mit Vorteil anzuwenden ist. Wenn wir durch eine planparallele Glasplatte, die wir schräg gegen die Gesichtslinie halten, nach einem Gegenstande blicken, sehen wir diesen in seiner natürlichen Größe, aber um ein wenig seitlich verschoben, und diese Verschiebung ist desto größer, je kleiner der Winkel zwischen den Lichtstrahlen und den Flächen der Platte wird. Das Ophthalmometer ist im wesentlichen ein Fernrohr, zum Sehen auf kurze Distanzen eingerichtet, vor dessen Objektivglase nebeneinander zwei Glasplatten stehen, so daß die eine Hälfte des Objektivglases durch die eine, die andere durch die andere Platte sieht. Stehen beide Platten in einer gegen die Achse des Fernrohrs senkrechten Ebene, so erscheint nur ein Bild des betrachteten Objekts, dreht man aber beide Platten ein wenig und zwar nach entgegengesetzten Seiten, so teilt sich das einfache Bild in zwei Doppelbilder, deren Entfernung desto größer wird, je größer der Drehungswinkel der Glasplatten. Diese Entfernung der Doppelbilder aber kann aus den Winkeln, welche die Platten mit der Achse des Fernrohrs machen, berechnet werden. Stellt man die beiden Doppelbilder einer zu messenden Linie so aufeinander ein, daß sie sich gerade mit ihren Enden berühren, so ist die Länge der Linie gleich der Entfernung ihrer beiden Doppelbilder voneinander und wie diese zu berechnen.

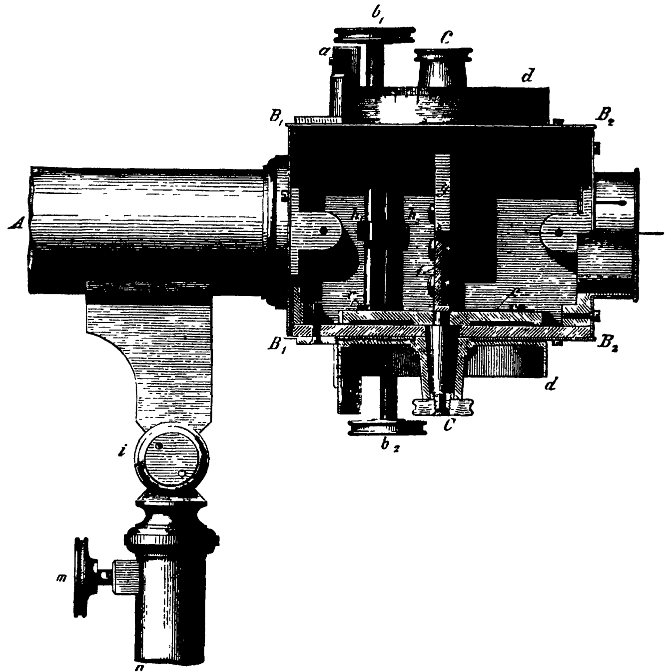


Fig. 4.

Das Instrument selbst ist in Fig. 4 in einer vertikalen Ansicht gezeichnet, in Fig. 5 in einem horizontalen Durchschnitte, in halber natürlicher Größe. Der viereckige Kasten B_1 B_1 B_2 B_2, welcher die ablenkenden Glasplatten enthält, ist am vorderen

Ende des Fernrohrs A befestigt. In Fig. 4 ist die vordere Wand des Kastens weggenommen, und außerdem sind alle Teile der unteren Hälfte in der Mittelebene durchschnitten gedacht. Die Grundlage des Kastens bildet ein starker viereckiger Rahmen, den man in Fig. 4 rings um den Kasten laufen sieht; an diesen sind dünne Messingplatten als Wände befestigt, wie namentlich in Fig. 5 sichtbar ist. In der Mitte der horizontalen Teile des Rahmens sind konische Durchbohrungen vorhanden, in denen die Drehungsachsen $C\,C$ der beiden Gläser laufen. Jede der Achsen trägt außerhalb des Kastens eine Scheibe d, deren zylindrischer Umfang in Winkelgrade geteilt ist; bei a ist ein Nonius angebracht, mittels dessen Zehnteile eines Grades abgelesen werden können. Innerhalb des Kastens trägt jede Achse zunächst ein Zahnrad $e\,e$ und einen Metallrahmen g, in welchem die Glasplatte f befestigt ist. Der Rahmen jeder Platte hat aber nur drei Seiten, die der anderen Glasplatte zugekehrte Seite desselben fehlt. Die beiden Glasplatten bildeten ursprünglich eine planparallele Platte. Für diese wurde ein vollständiger Metallrahmen gemacht und zwischen den Flächen der beiden Zahnräder befestigt, dann die Achsen abgedreht und endlich der Rahmen in der Mitte durchschnitten. Ebenso wurde das Glas durchschnitten, jede Hälfte in der entsprechenden Hälfte des Rahmens befestigt. So wurde eine genau übereinstimmende Stellung der Platten auf den beiden Achsen erreicht. Bewegt werden die Zahnräder durch die Triebe c_1 und c_2, die an den Achsen $b_1\,c_1$ und $b_2\,c_2$ befestigt sind. Jede dieser Achsen trägt außerdem in ihrer Mitte einen Trieb h. Dreht man den Knopf bei b_1, so wird mittels des Triebes c_1 das untere Zahnrad mit der unteren Glasplatte bewegt. Außerdem greift der Trieb h_1 in den Trieb h_2, und dreht die zweite Achse $b_2\,c_2$ um ebensoviel in der entgegengesetzten Richtung. Infolge davon wirkt auch der Trieb c_2 auf das obere Zahnrad, und dreht dieses mit der oberen Glasplatte um einen nahe ebenso großen Winkel wie die untere Platte. Gemessen wird die Drehung jeder Platte mittels der außerhalb des Kastens auf die Drehungsachse aufgesetzten geteilten Scheiben.

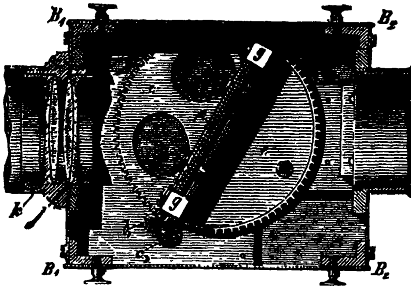


Fig. 5.

Es ist notwendig, zwei Platten anzubringen, welche um nahe gleiche Winkel gedreht werden, weil die Bilder der durch die Platten gesehenen Objekte nicht bloß seitlich verschoben, sondern auch ein wenig genähert werden, und wenn die Näherung für die beiden Bilder desselben Gegenstandes ungleich groß ist, man das Fernrohr nicht gleichzeitig auf beide genau einstellen kann.

In das vordere Ende des Fernrohrs sind zwei Objektivlinsen einzusetzen, k und l. Die achromatische Doppellinse k allein wird gebraucht, wenn man entferntere Objekte zu betrachten hat. Ihre bikonvexe Crownglaslinse wird wie gewöhnlich dem Objekte zugekehrt. Will man dagegen sehr nahe Objekte betrachten, so gibt eine einzelne Linse kein gutes Bild mehr, weil diese Linsen darauf berechnet sind, parallel einfallende Strahlen in einen Punkt zu vereinigen. Deshalb setze ich dann eine zweite achromatische Doppellinse l ein, deren Crownglas der anderen zugekehrt wird. Steht dann das Objekt im vorderen Brennpunkte dieser zweiten Linse, so macht sie die Strahlen parallel, die erste Linse vereinigt die parallelen Strahlen in ihrem hinteren Brennpunkte. Dadurch erhält man schärfere Bilder. Die Brennweite von k ist bei meinem Instrumente 6 Zoll, die von l 16 Zoll. Das Fernrohr ruht auf einer Säule n, in der ein Zylinder gedreht, sowie auch auf- und abbewegt werden kann. Auf diesem ist mittels des Charniergelenks i das Fernrohr befestigt. So kann man der Fernrohrachse beliebige Stellungen geben. Außerdem ist auch der Kasten mit den Gläsern drehbar um das vordere Ende des Fernrohrs.

Zunächst will ich nachweisen, wie die Verschiebung der Bilder aus dem Drehungswinkel der Glasplatten zu finden ist.

Es sei in Fig. 6 $A_1 A_1 A_2 A_2$ eine der Glasplatten, $a_1 c_1$ der einfallende, $c_1 c_2$ der gebrochene, $c_2 a_2$ der hindurchgegangene Strahl; $b_1 c_1 d_2$ das erste, $b_2 c_2 d_1$ das zweite Einfallslot. Der Einfallswinkel $b_1 c_1 a_1$, welcher dem Winkel $b_2 c_2 a_2$ gleich ist, werde mit α, der Brechungswinkel $d_2 c_1 c_2$, welcher gleich ist mit $c_1 c_2 d_1$, mit β bezeichnet und die Dicke der Platte mit h. Wird der Strahl $a_2 c_2$ rückwärts verlängert, so scheint der leuchtende Punkt a_1 für ein unterhalb der Platte befindliches Auge in dieser Verlängerung von $a_2 c_2$ zu liegen. Fällt man von a_1 ein Lot $a_1 f$, dessen Länge wir x nennen wollen, auf die genannte Verlängerung, so ist dies x die scheinbare seitliche Verschiebung des leuchtenden Punktes. Es ist

$$x = c_1 c_2 \cdot \sin \angle\, c_1 c_2 f$$

$$c_1 c_2 = \frac{h}{\cos \beta}$$

$$\angle\, c_1 c_2 f = \angle\, d_1 c_2 f - \angle\, d_1 c_2 c_1$$

$$= \alpha - \beta$$

$$x = h \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}.$$

Der Winkel α wird durch das Instrument gemessen; die Dicke der Glasplatte h muß bekannt sein, ebenso ihr Brechungsverhältnis n gegen Luft. Dann ist

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \beta.$$

Aus dieser Gleichung ist β zu finden, und dann sind alle Stücke zur Berechnung von x bekannt. Benutzt man zwei drehbare Platten, wie in dem Instrumente, welches ich beschrieben habe, geschieht, so ist die Entfernung E zweier beobachteten Punkte, deren Bilder man aufeinander gestellt hat, doppelt so groß als x, also

$$E = 2h \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}.$$

Die Werte von n und h kann man, wenn andere Bestimmungen derselben fehlen, durch Messungen, die mit dem Instrumente selbst gemacht werden, finden, indem man mißt, um welchen Winkel man die Platten drehen muß, um jeden Teilstrich eines genauen Maßstabes auf den nächsten oder den je zweiten, je dritten usw. einzustellen. Man bekommt dadurch eine Reihe zusammengehöriger Werte von x und α, aus denen man durch ein passendes Eliminationsverfahren h und n bestimmen kann. Will man viele Beobachtungen machen, so ist es ratsam, sich eine Tafel von E* für die ganzen Grade von $0°$ bis $60°$ zu berechnen.

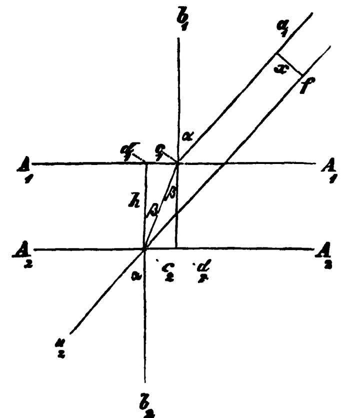


Fig. 6.

Dieselbe Stellung der Doppelbilder, welche bei einer Drehung um α Grade stattfindet, tritt auch ein bei einer Drehung um $-\alpha$, um $180-\alpha$ und um $\alpha-180$ Grade. Um Fehler der Teilung und des Parallelismus der Glasplatten zu eliminieren, ist es ratsam, bei diesen vier Stellungen jede Messung zu wiederholen und aus den vier gefundenen Zahlen das Mittel zu nehmen.

Einer der wichtigsten Vorteile des Ophthalmometers ist, daß die lineare Größe der scheinbaren Entfernung seiner Doppelbilder unabhängig ist von dem Abstande des Objekts. Man braucht also den letzteren nicht zu kennen, um die Messungen auszuführen.

* In der ersten Auflage steht statt E hier h, ein offenbarer Schreib- oder Druckfehler. N.

Wenn man das beschriebene Instrument zur Messung eines Hornhautbildes anwendet, wird man von kleinen Schwankungen des Kopfes des Beobachteten durchaus nicht gehindert, da beide Doppelbilder immer in derselben Weise sich mitbewegen, und ihre Stellung zueinander nicht geändert wird. Ist gleichzeitig das Objekt des Hornhautbildes weit genug entfernt, daß die kleinen Schwankungen des Kopfes gegen seine Entfernung verschwinden, so wird auch die Größe des Bildes nicht merklich durch die Schwankungen verändert, und es genügt daher zur Befestigung des Kopfes, daß man das Kinn leicht aufstützen läßt.

Als Objekt für das Hornhautbild wählt man entweder ein helles Fenster. Wenn man die parallelen Grenzen zweier Doppelbilder einer solchen hellen Fläche im Ophthalmometer aufeinander einstellt, ist das Auge des Beobachters sehr empfindlich für jedes Übereinandergreifen oder Auseinanderweichen der beiden Bilder, was sich sogleich durch eine weiße oder schwarze Linie zwischen den beiden gleichmäßig erhellten Feldern zu erkennen gibt. Oder man benutzt als Objekt einen fern genug vom Auge aufgestellten Maßstab, und bezeichnet einen seiner Teilpunkte durch eine kleine Lichtflamme, einen andern am besten durch zwei eben solche Flammen, die nebeneinander stehen. Bei der Messung stellt man das eine Bild der einen Flamme gerade mitten zwischen die der beiden anderen. Es ist diese Art der Einstellung sehr genau auszuführen, wie schon Bessel bei der Messung der Sternparallaxen mit dem Heliometer bemerkt hat.

Die Berechnung des Krümmungsradius der Hornhaut ist sehr einfach, wenn das gemessene Spiegelbild verhältnismäßig klein gegen den Radius ist. Es verhält sich dann die Größe des Objekts zur Entfernung des Objekts vom Auge wie die Größe des Bildchens zum halben Krümmungsradius, und der letztere ist aus dieser Proportion zu berechnen. Auch die Elliptizität der Hornhaut kann auf diese Weise bestimmt werden, wenn man das Auge durch passende Verlegung seines Fixationspunktes sich nacheinander um verschiedene bekannte Winkel nach den Seiten oder nach oben und unten wenden läßt, und für jede solche Stellung die Größe des Spiegelbildchens mißt. Dann findet man durch Rechnung zunächst die verschiedene Größe der Krümmungsradien an den verschiedenen spiegelnden Stellen der Hornhaut und aus diesen wieder die Elemente des Ellipsoides, dem sich die Hornhaut nähert.

Ich gebe hier die Elemente des horizontalen Durchschnitts der Hornhaut für drei weibliche Individuen zwischen 25 und 30 Jahren, an deren Augen ich ein System von Messungen durchgeführt habe.

Bezeichnung des Auges	O. H.	B. P.	J. H.
Krümmungsradius im Scheitel	7,338	7,646	8,154
Quadrat der Exzentrizität	0,4367	0,2430	0,3037
Halbe große Achse	13,027	10,100	11,711
Halbe kleine Achse	9,777	8,788	9,772
Winkel zwischen der großen Achse und der Gesichtslinie	4° 19′	6° 43′	7° 35′
Horizontaler Durchmesser des Umfangs	11,64	11,64	12,092
Abstand des Scheitels von der Basis	2,560	2,531	2,511

Der Mittelpunkt der äußeren Fläche der Hornhaut fällt in allen drei Augen fast genau mit dem Scheitel der Ellipse zusammen. Die Gesichtslinie liegt auf der Nasenseite des vorderen Endes der großen Achse des Hornhautellipsoides.

Messungen des Augapfels sind zu finden bei

1723—30. Petit in *Mém. de l'Acad. des sciences de Paris.* 1723. p. 54. — 1725. p. 18. — 1726. p. 375. — 1728. p. 408. — 1730. p. 4.

1738. Jurin, *Essay upon distinct and indistinct vision.* p. 141 in Smith's *complete System of Optics.*

1739. Helshama, *Course of Lectures on Natural Philosophy.* London 1739.

1740. WINTRINGHAM, *Experimental Inquiry on some parts of the animal structure.* London 1740.
1801. TH. YOUNG, *Philos. Transact.* 1801. p. 23.
1818. D. W. SOEMMERING, De oculorum hominis animaliumque sectione horizontali. Göttingen 1818. p. 79*.
1819. BREWSTER in *Edinburgh Philosoph. Journal.* 1819. Nr. I. p. 47.
1828. G. R. TREVIRANUS, Beiträge zur Anat. und Physiol. der Sinneswerkzeuge. Bremen 1828. Heft I. S. 20*. — Hier sind auch die Resultate der älteren Beobachter zusammengestellt.
1832. C. KRAUSE, Bemerkungen über den Bau und die Dimensionen des menschlichen Auges, in MECKELS Archiv für Anatomie und Physiol. Bd. VI. S. 86* [Beschreibung der Methode und Messungen an zwei Augen]. Auszug davon in POGGENDORFFS Ann. XXXI. S. 93*.
1836. C. KRAUSE in POGGENDORFFS Ann. XXXIX. S. 529* [Messungen an 8 menschlichen Augen].
1839. KOHLRAUSCH über die Messung des Radius der Vorderfläche der Hornhaut am lebenden menschlichen Auge, in OKENS Isis. Jahrg. 1840. S. 886*.
1846. SENFF in R. WAGNERS Handwörterbuch der Physiol. Bd. III. Abt. 1. Art.: Sehen. S. 271*.
1847. E. BRÜCKE, Beschreibung des menschl. Augapfels. S. 4 u. 45*.
1854. H. HELMHOLTZ, in GRAEFES Archiv für Ophthalmologie. II. S. 3.
1855. SAPPEY, *Gazette médicale.* Nr. 26, 27.
1857. ARLT, Archiv f. Ophthalmologie. III, 2. S. 87.
1858. NUNNELEY, *On the organs of vision.* London. p. 129.
1859. J. H. KNAPP, Die Krümmung der Hornhaut des menschlichen Auges. Habilitationsschrift. Heidelberg 1859. Auch: Arch. f. Ophthalm. VI, 2. S. 1—52.
1860. MEYERSTEIN, Beschreibung eines Ophthalmometers nach HELMHOLTZ. POGGENDORFFS Ann. CXI. S. 415—425, und HENLE u. PFEUFERS Zeitschr. XI. S. 185—192.
1861. v. JÄGER, Über die Einstellung des dioptrischen Apparates im menschlichen Auge. Wien.
1864. R. SCHELSKE, Über das Verhältnis des intraocularen Druckes zur Hornhautkrümmung. Arch. f. Ophthalm. X, 2. S. 1—46.

§ 3. Die Uvea.

Das System der **Uvea** trägt seinen Namen von dem Vergleiche mit einer dunklen Weinbeere, die man von ihrem Stiele getrennt hat. Die Stielöffnung entspricht der Pupille. Sämtliche Teile dieses Systems zeichnen sich dadurch aus, daß sie auf ihrer inneren Fläche mit einer Lage von Pigmentzellen bedeckt sind, teilweise auch solche in ihrer Substanz verteilt zeigen, denen sie ihre dunkle Farbe verdanken. Die Uvea ist an zwei Stellen fest mit der Sehnenhaut verbunden, nämlich hinten an der Eintrittsstelle des Sehnerven Fig. 2 (S. 3) *d* und vorn an der inneren Wand des SCHLEMMschen Kanals *a*. Den Teil *abba*, welcher nach vorn und innen von dieser letzteren Befestigung und zunächst hinter der Hornhaut liegt, nennt man *Iris* (Blendung); den hinteren Teil, welcher die innere Fläche der Sehnenhaut bekleidet, Aderhaut (*Chorioidea*).

Im hinteren Teile des Augapfels bildet die Aderhaut eine dünne dunkle Membran, größtenteils aus Blutgefäßen zusammengesetzt, die durch ein eigentümliches Gewebe verbunden sind. Dieses Gewebe, welches KÖLLIKER als unentwickeltes elastisches Gewebe bezeichnet, besteht aus ineinander geflochtenen strahligen, zum Teil mit Pigment gefüllten Zellen, deren Ausläufer äußerst fein verästelt sind. Dies eigentümliche Stroma verbindet zunächst die Arterien und Venen der Aderhaut, die Schicht der Kapillargefäße (*membrana chorio-capillaris*) liegt ihm nach innen lockerer auf, und diese wird nach innen, gegen

die Retina hin endlich von den Pigmentzellen bedeckt. Letztere bilden auf den hinteren Teilen der Aderhaut eine einfache, auf dem Ciliarteile dagegen eine mehrfache Lage. Ihr Kern ist meist durch seine Durchsichtigkeit zwischen dem schwarzen Pigment erkennbar. In Fig. 7 stellt *a* diese Zellen von der Fläche, *b* von der Seite nach Kölliker dar, *c* Pigmentkörner, kleine plattgedrückte, länglich runde Körnchen von 0,0016 mm Länge, welche durch Chlor und kaustisches Kali zerstört werden.

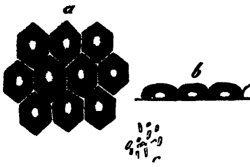


Fig. 7.

Vorn legt sich an die äußere Fläche der Aderhaut ein Muskel, der Ciliarmuskel (*Tensor Chorioideae, Musculus* Brückianus), von ihrer inneren Fläche dagegen erheben sich faltenförmige, durch ein Konvolut von Gefäßstämmen ausgefüllte Hervorragungen, die Ciliarfortsätze (*Processus ciliares*). In Fig. 2 S. 3 ist angenommen, daß der dargestellte Durchschnitt auf der linken Seite durch einen Ciliarfortsatz *c* hindurchgeht, auf der rechten Seite dagegen zwischen zwei solchen Fortsätzen, daher hier allein der Ciliarmuskel *h* in dem Schnitte sichtbar ist. Die Fasern des Ciliarmuskels entspringen von der inneren Wand des Schlemmschen Kanals, da, wo sich deren elastischer und sehniger Teil miteinander verbinden, bei *a* Fig. 2 und Fig. 3, laufen dann an der äußeren Seite der Aderhaut nach hinten, und heften sich an diese Membran. Die Fasern dieses Muskels gehören zu den sogenannten organischen, wie wir sie in den meisten nicht willkürlich bewegten Muskeln antreffen; sie sind mit längsovalen Kernen versehen und nicht quergestreift. Brücke, der den Muskel entdeckte, nimmt an, daß er die Aderhaut (und die mit dieser bei *g* engverbundene Netzhaut und Glashaut) um den Glaskörper anspanne, Donders dagegen, daß die Aderhaut sein fester Ansatzpunkt sei, und er im Gegenteil den elastischen Teil der inneren Wand des Schlemmschen Kanals verlängere und so den Ansatz der Iris nach hinten rücke. Vielleicht verbinden sich beide Wirkungen miteinander[1].

Die Ciliarfortsätze sind häutige Falten der Aderhaut, welche in Richtung der Meridianlinien des Auges verlaufen, 70 bis 72 an der Zahl. Sie erheben sich in der Gegend des vorderen Endes der Netzhaut (Fig. 2 *g*), verlaufen allmählich ansteigend nach vorn, wo sie in der Gegend des äußeren Linsenrandes ihre größte Höhe erreichen, und senken sich dann schnell, indem die vorderen Ausläufer der meisten noch auf die Hinterseite der Iris übergehen. Ihre hervorstehenden scharfen Ränder sind oft von Pigment entblößt, und zeichnen sich als weiße Linien ab, wenn man die Ciliargegend durch den Glaskörper von hinten betrachtet. Die Ciliarfortsätze enthalten eine große Menge von Gefäßstämmen, durch ein ähnliches Stroma verbunden, wie es in der Aderhaut vorkommt.

Die Iris, der vorderste Teil der Uvea, bildet für das Auge eine bewegliche Blendung. Sie entspringt mit dem Ciliarmuskel gemeinschaftlich an der inneren Wand des Schlemmschen Kanals, und zwar an der Grenze des hinteren sehnigen Teils dieser Wand, ist aber (Fig. 3 *b*) durch ein Netzwerk elastischer Fasern, welche frei durch die wässrige Feuchtigkeit verlaufen, mit dem elastischen Teile dieser inneren Wand verbunden. Man nennt diese elastischen Fasern das *Ligamentum Iridis pectinatum.* Von da verläuft die Iris, sich an die vordere

[1] S. unten § 12.

Fläche der Linse legend, nach innen bis zu ihrem inneren oder Pupillarrande, und ist dabei leicht nach vorn gewölbt. Sie enthält organische Muskelfasern, welche zu zwei Muskeln zusammengefaßt werden können.

1. Der Ringmuskel der Pupille (*Musculus Contractor sive Sphincter Pupillae*) umgibt in Form eines Ringes von 1 mm Breite den Pupillarrand; er liegt vor der Pigmentschicht und hinter der Hauptmasse der zum Pupillarrande verlaufenden Gefäße und Nerven. Seine Fasern verlaufen in konzentrischen Ringen, und verengern deshalb bei ihrer Zusammenziehung die Pupille.

2. Der Erweiterer der Pupille (*Musculus Dilatator Pupillae*). Seine Fasern entspringen von der inneren Wand des SCHLEMMschen Kanals und wohl auch von den Fasern des *Ligamentum pectinatum* und verlaufen an der hinteren Seite der Iris netzförmig miteinander verbunden nach innen, wo sie sich in den Ringmuskel verlieren.

Das Stroma der Iris ist Bindegewebe; hinten ist sie von der Pigmentzellenschicht, vorn von einem Epithelium bedeckt. Auch ihr Stroma enthält oft Pigmentzellen; dann ist ihre Farbe braun, sonst erscheint sie als ein trübes Medium vor dem dunklen Pigmente blau.

Das Verhalten der Gefäße der Uvea bietet vieles Eigentümliche. Ich habe schon angeführt, daß die Gefäße den größten Teil der Masse dieses Systems ausmachen. Ihre zuführenden Arterien (*Arteriae ciliares posticae breves* für die Aderhaut und Ciliarfortsätze, *posticae longae* und *anticae* für die Iris) treten durch die Sclerotica ein, und kommunizieren mit den Venen nicht bloß, wie es in anderen Teilen des Körpers der Fall ist, durch ein feines Kapillargefäßnetz, sondern auch durch ziemlich weite Verbindungsröhren, welche auf der Aderhaut in zierlich geordneten Bögen wedelförmig aus den Arterien entstehen und sich wieder zu Venen (*Venae vorticosae*) sammeln. Die *Arteriae ciliares posticae breves,* etwa 20 Ästchen, durchbohren die Sclerotica an ihrem hinteren Teile, laufen, sich fortdauernd gabelförmig spaltend, nach vorn, und geben ihr Blut teils durch das Kapillargefäßnetz, welches, so weit die Netzhaut reicht, an der inneren Seite der Aderhaut unter den Pigmentzellen liegt, teils durch die weiten Verbindungsäste der Vortices an die Venen ab, welche teils (*Vasa vorticosa*) am Äquator des Augapfels, teils (*Venae ciliares posticae*) am hinteren Teile durch die Sclerotica austreten. Ein großer Teil der Äste dieser Arterien läuft aber nach vorn in die Ciliarfortsätze und bildet in diesen ein Gefäßknäuel, dessen rückkehrende Äste in die vorderen Bögen der Vortices übergehen. Das Gefäßnetz der Iris hängt teils mit dem der Ciliarfortsätze zusammen, zum größten Teil empfängt es aber sein Blut aus besonderen Stämmen, die teils hinten durch die Sclerotica treten (*Art. ciliares posticae longae*) und zwischen Aderhaut und Sehnenhaut nach vorn bis zum Ciliarmuskel verlaufen, teils auch vorn eintreten (*Art. ciliares anticae*). Sie bilden in der Iris zwei anastomosierende Gefäßkränze, den einen (*Circulus arteriosus Iridis major*) am peripherischen Rande, den anderen (*Circ. arter. minor*) nahe dem Pupillarrande. An der Stelle des letzteren ist die Iris am dicksten, und bildet auf ihrer vorderen Fläche einen Vorsprung.

Am unverletzten Auge sieht man die Iris durch die Hornhaut. Durch die Wirkung der Strahlenbrechung erscheint sie der Hornhaut näher, also mehr nach vorn gewölbt, als sie es in Wirklichkeit ist. Wenn man dagegen das Auge einer Leiche unter Wasser bringt, dessen Brechungsvermögen dem der wässrigen Feuchtigkeit ziemlich gleich ist, so fällt die Strahlenbrechung an der Hornhaut fast ganz weg, und man

sieht die Iris in ihrer natürlichen Lage, wo sie schwach oder nur wenig gewölbt erscheint. Um am lebenden Auge eine richtige Anschauung von der Iris zu erhalten, hat J. CZERMAK[1] ein Instrument angegeben unter dem Namen **Orthoskop**, welches im wesentlichen eine kleine Wanne mit Glaswänden ist, die an das Gesicht so angesetzt wird, daß das Auge die Hinterwand derselben bildet, und dann voll Wasser gegossen wird. Das in Fig. 8 abgebildete Instrument hat eine untere Wand *fcb* und eine innere (der Nase zugekehrte) *gab* aus Metallblech gebildet. Beide sind am freien Rande passend ausgeschnitten, um sie an das Gesicht ansetzen zu können. Die vordere Wand *abcd* und die äußere *cdef* sind aus ebenen Glasplatten gebildet. Um den Rand des Instruments wasserdicht an das Gesicht ansetzen zu können, empfiehlt CZERMAK geknetete Brotkrume an das Gesicht anzulegen und den Rand des Instruments hineinzudrücken. Das Auge wird nun zunächst geschlossen, Wasser von 23 bis 26° R. in das Kästchen gegossen, und dann das Auge geöffnet. Die Hornhaut tritt von der Seite gesehen als eine durchsichtige gewölbte Blase hervor, die Iris tritt als ein fast ebener Vorhang von ihr zurück.

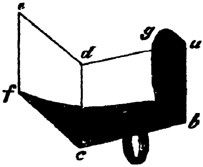


Fig. 8.

Es könnten bei dieser Methode Zweifel übrig bleiben, ob das Bild der Iris durch die Brechung zwischen Hornhaut und Wasser einerseits, Hornhaut und wässriger Feuchtigkeit andererseits nicht noch ein wenig verändert sei, und da die Frage nach der Form und Lage der Iris für die Lehre von der Akkommodation des Auges von großer Wichtigkeit ist, so will ich hier noch andere Untersuchungsmethoden beschreiben. Eine leicht auszuführende Art, um an lebenden Augen das Relief der Iris kennen zu lernen, ist die folgende. Man stelle seitlich und etwas nach vorn von dem beobachteten Auge ein Licht auf, und konzentriere durch eine Sammellinse von etwa 2 Zoll Brennweite und möglichst großer Öffnung dessen Strahlen auf einen Punkt der Hornhaut, so daß auf dieser ein Bild des Lichts entworfen wird. Die Hornhaut sieht an der stark beleuchteten Stelle trübe aus. Der Brennpunkt auf der Hornhaut bildet nun gleichsam eine neue Lichtquelle, deren Strahlen, ohne weiter gebrochen zu werden, geradlinig auf die Iris fallen, und, wenn sie schief auffallen, Schlagschatten verschiedener Länge auf ihr entwerfen, aus denen man leicht beurteilen kann, wieviel ihre einzelnen Teile hervorspringen oder zurückweichen. Bei der angegebenen Untersuchungsmethode findet man die Iris kurzsichtiger Augen oft so platt, daß gar kein Schlagschatten auf ihr entsteht. Bei normalen Augen dagegen sieht man nahe um die Pupille herum den dem *Circulus arteriosus minor* entsprechenden Wulst, der deutliche Schlagschatten wirft. Wenn der lichtgebende Brennpunkt etwa 1 mm vom Rande der Hornhaut absteht, verlängert sich dieser Schlagschatten meist bis zum peripherischen Rande der Iris.

Um sich an lebenden Augen von dem sehr wichtigen Umstande zu überzeugen, daß die Iris der Linse dicht anliegt, kann man dasselbe Verfahren gebrauchen, mit dem Unterschiede, daß man den Brennpunkt der Sammellinse ein wenig von der Seite her auf die vordere Linsenfläche fallen läßt. Bei so starker Beleuchtung erscheint dann die Substanz der Linse weißlich trübe, und man sieht, daß von der Iris kein Schlagschatten geworfen wird. Noch besser geschieht dies mittels der Reflexe, welche die vordere Fläche der Linse von einfallendem Lichte gibt. Wenn in Fig. 9 $C_1\,C_2$ ein konvexer Kugelspiegel ist, DE ein davorstehender dunkler Schirm mit einer Öffnung FG, das Auge des Beobachters sich in A befindet und ein Licht in B, und der am Rande der Öffnung bei F vorbeigehende Lichtstrahl BF in H nach HA zurückgeworfen wird, so wird das Auge von den zwischen H und C_1 gelegenen Punkten der Spiegelfläche kein zurückgeworfenes Licht erhalten können, diese werden vielmehr die dunkle Hinterseite des Schirms spiegeln müssen. So wird in der Richtung AJ

[1] J. CZERMAK, Prager Vierteljahrsschrift für prakt. Heilkunde. Bd. XXXII. S. 154. 1851.

Licht gespiegelt werden, welches von dem Punkte *K* des Schirms ausgegangen ist. Zwischen *F* und *H* wird also das Auge einen dunklen Teil der Spiegeloberfläche so oft erblicken müssen, als nicht der Rand des Schirms der spiegelnden Fläche ganz dicht anliegt. Man kann sich von der Richtigkeit des Gesagten an jeder spiegelnden konvexen Fläche, z. B. eines gewölbten metallenen Knopfes, überzeugen, für welche man sich ein passendes dunkles Diaphragma mit runder Öffnung gemacht hat. Nur wenn der Rand der Öffnung dicht an der Fläche liegt, reichen die Spiegelbilder, welche sie von äußeren Gegenständen entwirft, bis an den Rand des Diaphragma. Ist dagegen zwischen letzterem und der spiegelnden Fläche ein kleiner Zwischenraum, so sieht man an dem dem Auge gegenüberliegenden Rande der Öffnung eine dunkle Linie sich zwischen die Spiegelbilder und den Rand der Öffnung einschieben.

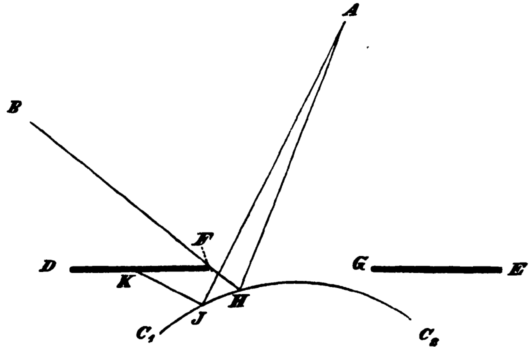


Fig. 9.

Die Flächen der Linsen reflektieren ebenfalls Licht, aber sehr wenig. Man sieht diese Reflexe[1], wenn sich das Auge in einem dunklen Zimmer befindet, in welchem nur ein Licht enthalten ist. Man stellt das Licht vor dem Auge, etwas seitlich von der nach vorn verlängerten Augenachse, auf. Der Beobachter sieht von der anderen Seite her in das Auge, so daß seine Gesichtslinie etwa denselben Winkel mit der Augenachse macht, wie das einfallende Licht. Neben dem bekannten hellen Reflexe der Hornhaut sieht er dann zwei andere sehr viel schwächere. Der größere von beiden bildet ein aufrechtes, ziemlich verwaschenes Bild der Flamme und rührt von der vorderen Linsenfläche her, der kleinere bildet ein schärferes umgekehrtes Bildchen und wird von der hinteren Linsenfläche entworfen. Von den Augenärzten werden diese Reflexe die SANSONschen Bildchen genannt. Wenn man die Stellung des Lichts oder des eigenen Auges verändert, während man sie beobachtet, verändert sich auch die Stellung der Bildchen, und so gelingt es leicht, das erstgenannte derselben, das der vorderen Linsenfläche, bis an jede beliebige Stelle des Randes der Pupille zu führen. Man sieht es dann stets, auch an dem dem Beobachter gegenüberliegenden Rande der Pupille, bis dicht an die Iris rücken, ohne zwischenliegende schwarze Linie. Wenigstens ist dies unter normalen Umständen ohne künstliche Erweiterung der Pupille, soviel ich gefunden habe, stets der Fall, und daraus folgt mit Bestimmtheit, daß der Pupillenrand der Iris der Linse anliege.

Die Entfernung der Pupillenfläche von dem Scheitel der Hornhaut ist von C. KRAUSE an durchschnittenen Augen gemessen worden. Indessen ist die Verbindung der Linse mit der Sclerotica durch die Ciliarfortsätze keine so straffe, daß nicht nach der Durchschneidung beträchtliche Verschiebungen eintreten sollten.

Davon, daß die Pupillarfläche hinter einer durch den äußeren Rand der Hornhaut gelegten Ebene liegt, kann man sich am lebenden Auge überzeugen, wenn man es so von der Seite ansieht, daß die Pupille hinter dem Rande der Sclerotica zu verschwinden beginnt. Man sieht alsdann, wie in Fig. 10, perspektivisch vor der Pupille einen helleren Streifen, ein verzogenes Bild der Iris, und vor diesem am Rande der Hornhaut einen dunkleren Streifen, den jenseitigen über die Hornhaut greifenden Rand

[1] Entdeckt von PURKINJE. S. dessen Abhandlung: De examine physiologico organi visus et syst. cutanei. Vratisl. 1823. Zur Diagnose von Krankheiten benutzt von SANSON (*Leçons sur les maladies des yeux*. Paris. 1837). Ihr Ursprung ist genauer bestimmt durch H. MEYER (HENLES und PFEUFERS Zeitschrift f. rationelle Medizin. 1846. Bd. V.).

der Sehnenhaut. Bewegt der Beobachter sein Auge noch weiter zurück, so verschwindet ihm die Pupille und Iris ganz, und hinter dem noch sichtbaren Teile der Hornhaut erscheint nur noch der jenseitige Scleroticalrand. Da die Lichtstrahlen, welche einmal durch die Hornhaut in die wässrige Feuchtigkeit eingetreten sind, geradlinig durch diese fortgehen, so folgt daraus, daß die Iris weiter zurückliegt als eine die äußeren Ränder der Hornhaut verbindende Linie.

Kennt man den Krümmungsradius im Scheitel der Hornhaut, so kann man die Distanz der Pupillenfläche vom Scheitel der Hornhaut am lebenden Auge ziemlich genau bestimmen, indem man die scheinbare Lage der Iris im Verhältnis zur scheinbaren Lage eines von der Hornhaut gespiegelten Lichtpunktes bestimmt. Das Spiegelbild eines entfernten Lichtpunktes liegt ein wenig hinter der Fläche der Pupille, wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man von verschiedenen Seiten das Auge ansieht, und die perspektivische Lage des Lichtpunktes zu den Rändern der Pupille sich merkt.



Fig. 10.

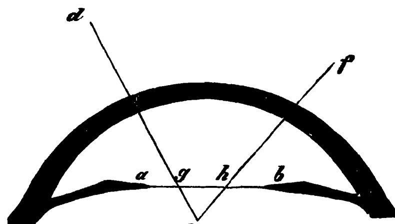


Fig. 11.

Ist $a\,b$ (Fig. 11) die Pupille, c der scheinbare Ort des gespiegelten Lichtpunktes, sind $d\,c$ und $f\,c$ zwei verschiedene Richtungen, aus denen der Beobachter nach dem Punkte c hinblickt, so wird dieser Punkt von d aus gesehen hinter dem Punkte g der Pupillarebene, also scheinbar näher an a, von f aus hinter dem Punkte h scheinbar näher an b liegen; wie es auch in Wirklichkeit der Fall ist. Man würde nun die Lage des Punktes c am einfachsten genau bestimmen können, wenn man seine scheinbare perspektivische Entfernung von den beiden Rändern der Pupille mißt, was mit dem Ophthalmometer ausführbar wäre. Aber hierbei sind die fast fortdauernden Schwankungen der Weite der Pupille hinderlich.

Ich fand es deshalb vorteilhafter, etwas anders zu verfahren. Es seien an dem betreffenden Auge die elliptischen Achsen der Hornhaut gemessen worden, und die Lage der Gesichtslinie zu ihnen bekannt. Steht dann vor dem Auge ein Licht, dessen Stellung in bezug auf die Gesichtslinie ebenfalls bekannt ist, so läßt sich aus den bekannten Gesetzen der kugeligen spiegelnden Flächen leicht der scheinbare Ort des von der Hornhaut entworfenen Spiegelbildes berechnen. Wir nehmen also im folgenden die Lage dieses Spiegelbildes immer als bekannt an. Sucht man nun eine solche Stellung des Lichts, des Fixationspunktes und des Ophthalmometers, daß man von den durch letzteres erblickten Doppelbildern des Lichtpunktes auf der Hornhaut gleichzeitig das eine mit dem einen Rande der Pupille, das andere mit dem anderen zum Decken bringen kann, so folgt daraus, daß von dem Orte des Ophthalmometers aus gesehen der gespiegelte Lichtpunkt perspektivisch hinter dem Mittelpunkte der Pupille liegt. Es seien in Fig. 12 die beiden Linien $e\,d$ und $\varepsilon\,\delta$ parallel der Fernrohrachse des Ophthalmometers, $a\,b$ und $\alpha\,\beta$ die beiden Doppelbilder des horizontalen Durchschnitts der Pupille. Wir nehmen an, daß der Mittelpunkt der Pupille, das Licht, die Achse des Fernrohrs, die Gesichtslinie des beobachteten Auges alle in derselben Horizontalebene liegen. Nach der oben in § 2 gegebenen Theorie dieses Instruments müssen alle Verbindungslinien entsprechender Punkte der beiden Doppelbilder gleich lang und senkrecht gegen die Achse des Fernrohrs, die beiden Doppelbilder selbst aber

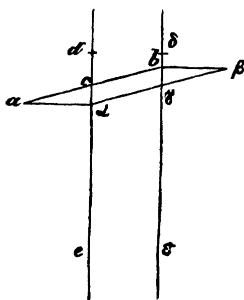


Fig. 12.

kongruent sein. Danach ist also $a\alpha$ gleich und parallel $b\beta$, und ab gleich und parallel $\alpha\beta$. Es seien nun d und δ die entsprechenden Doppelbilder des Lichtpunktes, und es sei eine solche Stellung des Auges gefunden, bei der d von α gedeckt wird und δ von b, d. h. wo die der Fernrohrachse parallele Linie de durch α und $\delta\varepsilon$ durch b geht. Aus der Theorie der Parallellinien ergibt sich nun:

$$d\delta : b\beta = \alpha\gamma : \gamma\beta$$

$$d\delta : a\alpha = cb : ac.$$

Da nun aber die Entfernungen entsprechender Punkte der Doppelbilder gleich sind, ist

$$d\delta = a\alpha = b\beta.$$

folglich auch

$$\alpha\gamma = \gamma\beta \text{ und}$$

$$cb = ac.$$

Die Punkte c und γ, hinter welchen die Lichtpunkte d und δ perspektivisch erscheinen, sind also die Mittelpunkte der Pupillen.

Es ist nun leicht, durch passende Abmessungen zu ermitteln, welchen Winkel die Linie ed oder die Achse des Fernrohrs mit der Gesichtslinie des beobachteten Auges macht. Dann ist die Lage der Linie ed im Horizontalschnitt des Auges gegeben durch einen Punkt und den Winkel, den sie mit einer anderen Linie von bekannter Richtung, der Gesichtslinie, bildet. In dieser Linie ed liegt auch der Mittelpunkt der Pupille.

Nun braucht man nur noch eine zweite Beobachtung derselben Art zu machen, wobei man von einer anderen Richtung her in das beobachtete Auge sieht. Man bekommt dann eine zweite gerade Linie von bekannter Lage, in welcher der Mittelpunkt der Pupille liegt. Dieser muß also dort liegen, wo die beiden betreffenden Linien sich schneiden, und seine Entfernung von der Hornhaut kann dann durch Konstruktion oder Rechnung leicht gefunden werden.

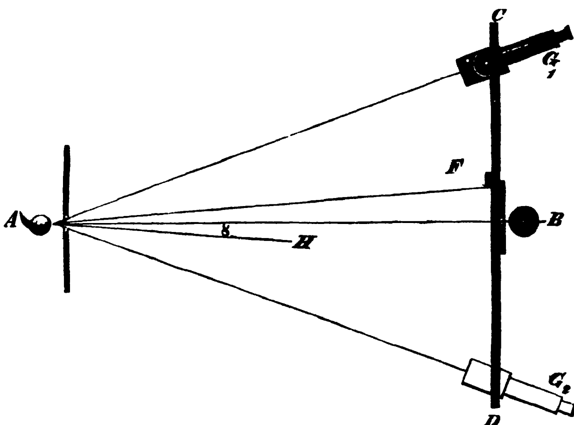


Fig. 13.

Die Beobachtungsmethode war nun folgende: A (Fig. 13) ist das Auge, an welchem die Messung vorgenommen werden soll; es sieht durch die Öffnung eines Schirms, um seine Lage annähernd festzustellen. In einiger Entfernung von ihm befindet sich eine horizontale Skale CD. Denkt man sich vom Auge A ein Lot auf die Skale gefällt, so befindet sich an dessen Fußpunkte B ein Schirm mit einer kleinen Öffnung, hinter der eine Lampenflamme steht, deren Licht durch die Öffnung auf das Auge fällt, und von der Hornhaut gespiegelt wird. Bei F befindet sich ein verschiebbares Zeichen, welches als Gesichtspunkt dient. Bei G_1 und G_2 sind die Stellungen angedeutet, die man dem Ophthalmometer nacheinander gibt, beide gleichweit von B entfernt. Für die drei Füße des Fernrohrs macht man Marken auf dem Tische, da die Stellung des Fernrohrs während des Versuchs gewechselt wird. Das Auge A wird nun angewiesen, fortdauernd nach dem Zeichen F hinzusehen und allen Bewegungen desselben zu folgen. Der Beobachter, welcher zuerst von G_1 aus beobachten möge, dreht die Glasplatten des Ophthalmometers so weit, bis von den Doppelbildern

des hellen Pünktchens auf der Hornhaut das eine mit dem einen Pupillarrande zusammentrifft. Trifft dann das andere nicht gleichzeitig auf den anderen Rand, so verschiebt er das Zeichen F so lange an der Skale, bis dies der Fall ist, und merkt den Teilstrich der Skale, wo F steht. Dasselbe Verfahren wird wiederholt bei der zweiten Stellung des Ophthalmometers in G_2.

Die Länge AB ist in Skalenteilen zu messen; daraus ist der Winkel FAB zu finden.

$$\frac{FB}{AB} = \operatorname{tang} \angle\, FAB.$$

Ist AH die große Achse des Hornhautellipsoides und der Winkel FAH schon bekannt, so ergibt sich daraus BAH, welchen Winkel man braucht, um die Lage des Spiegelbildes der Hornhaut zu bestimmen. Ebenso bestimmt man den Winkel $G_1\,AH$, welcher die Richtung bestimmt, in welcher der Beobachter in das Auge gesehen hat. Der Mittelpunkt der scheinbaren Pupille (d. h. wie diese durch die Hornhaut erscheint) liegt dann also in einer mit $G_1\,A$ parallelen Linie, welche durch den scheinbaren Ort des Hornhautbildchens gelegt ist.

Wie aus der scheinbaren Lage des Mittelpunktes der Pupille seine wirkliche Lage berechnet werden kann, wird sich in § 9 und 10 ergeben[1].

Die Resultate für die drei Augen, für deren Hornhäute ich die Abmessungen mit dem Ophthalmometer bestimmt habe, waren folgende:

		O. H.	B. P.	J. H.
Abstand der Pupillarebene vom Scheitel der Hornhaut	scheinbar	3,485	3,042	3,151
	wirklich	4,024	3,597	3,739
Abstand des Mittelpunktes der Pupille von der Hornhautachse nach der Nasenseite	scheinbar	0,037	0,389	0,355
	wirklich	0,032	0,333	0,304

Daß die Iris der Linse anliege und nach vorn gewölbt sei, ist von den Anatomen vielfach bestritten worden. Die älteren Anatomen nahmen es an, bis namentlich Petit, auf Grund seiner Untersuchungen an gefrorenen Augen, das Gegenteil behauptete und zwischen Iris und Linse die sogenannte hintere Augenkammer annahm. In gefrorenen Augen findet man bald dünne Eisblätter zwischen Iris und Linse, bald nicht. Der Meinung von Petit folgten fast alle späteren Anatomen, bis in der neuesten Zeit Stellwag von Carion und Cramer sich wieder für die enge Anlagerung der Iris an die Linse erklärten. Ich selbst fand es möglich, in der oben beschriebenen Weise direkte Beobachtungen dafür zu liefern, welche mir keinen Zweifel übrig zu lassen scheinen. Neuerdings verteidigt dagegen Budge wieder die Ansicht von Petit.

1728. Petit in *Mém. de l'Acad. Roy. des sciences.* 1728. p. 206 u. 289.
1850. Stellwag von Carion in Zeitschrift d. Wiener Ärzte. 1850. Heft 3, S. 125
1852. Cramer in Tijdschrift der Nederl. Maatschappij tot bevord. der Geneeskunst. 1852. Jan.
1853. Derselbe. Het Accommodatievermogen der Oogen. Haarlem. bl. 61*.
1855. J. Budge über die Bewegung der Iris. Braunschweig. S. 5—10 (gibt auch die ältere Literatur der Streitfrage).
Helmholtz in Graefes Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abt. 2, S. 30.

Nachtrag (aus der ersten Auflage S. 820ff. 1867.)

Darüber, daß der mittlere Teil der Iris im normalen Auge der Linse anliegt, scheint allgemeines Einverständnis zu herrschen. Nur darüber sind die

[1] Helmholtz in Graefes Archiv für Ophthalmologie. Bd. 1. Abt. 2, S. 31.

Ansichten noch verschieden, wieviel freien Raum man sich zwischen dem peripherischen Teil der Iris und den vorderen Rändern der Ciliarfortsätze und der Zonulafalten zu denken habe, ob auch hier der Zwischenraum nur spaltförmig sei, wie CRAMER, VAN REEKEN, ROUGET und HENKE annehmen, oder ob dort der Meinung von ARLT gemäß ein offener ringförmiger Raum, einer hintern Augenkammer entsprechend, existiere. Da im toten Auge die Ciliarfortsätze blutleer und zusammengefallen sind, und man nicht genau weiß, wie weit sie durch Blut aufgeschwellt werden, so ist darüber schwer zu entscheiden.

In den Figuren 2 u. 3, S. 3 u. 6 habe ich die Ciliarfortsätze wohl zu weit mit der Iris in Verbindung gebracht; ich habe den Zusammenhang dieser Teile nach Durchschnitten getrockneter Präparate, wie Fig. 3 eines ist, gezeichnet, in denen aber durch das Trocknen der einspringende Winkel der Pigmentschicht zwischen Ciliarfortsätzen und Iris herausgezerrt und verflacht worden zu sein scheint. An frischen Präparaten sind die Ciliarfortsätze an ihrem vorderen Ende allerdings durch einen viel tieferen Einschnitt von der Iris getrennt, als die angegebenen Figuren es darstellen.

1855. VAN REEKEN. Ontleedkundig onderzoek van den toestel voor accommodatie van het Oog. Onderzoekingen gedaan in het Physiol. Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VII, 248—586.
— ROUGET in *Gaz. méd.* 1855. Nr. 50.
1860. W. HENKE. Der Mechanismus der Akkommodation für Nähe und Ferne. Archiv für Ophthalm. VI, 2. S. 53—72.
1863. O. BECKER. Lage und Funktion der Ciliarfortsätze im lebenden Menschenauge. Wien. Mediz. Jahrbücher. S. 159.

In betreff des Ciliarmuskels ist die Entdeckung von H. MÜLLER und ROUGET zu erwähnen, daß die inneren gegen die Ciliarfortsätze hingekehrten Teile dieses Muskels zwischen die oben beschriebenen meridional gerichteten Fasern eine große Menge ringförmig, dem Äquator der Linse parallel verlaufende Bündel eingewebt enthalten. Diese äquatorial verlaufenden Fasern gehen übrigens vielfältig in meridional gerichtete über. Über die Wirkung dieser Fasern unten mehr in den Nachträgen zu § 13.

1856. C. ROUGET. *Recherches anatomiques et physiologiques sur les appareils érectiles. Appareil de l'adaptation de l'oeil. C. R.* XLII, 937—941. *Institut.* 1956. p. 193 bis 194. *Cosmos.* VIII, 559—560.
— H. MÜLLER. *Réclamation de priorité. C. R.* XLII, 1218—1219.
— C. ROUGET. *Réponse à une réclamation de priorité addressée par* M. MÜLLER. *C. R.* XLII, 1255—1256. *Institut.* 1856. p. 245. *Cosmos.* IX, 9.
1857. H. MÜLLER. Über einen ringförmigen Muskel am Ciliarkörper. Archiv für Ophthalmol. III, 1.
— ARLT. Zur Anatomie des Auges. Ebenda. III, 2.
1858. H. MÜLLER. Einige Bemerkungen über die Binnenmuskeln des Auges. Ebenda. IV, 2. p. 277—285.

Was den Dilatator der Pupille betrifft, so ist dessen Existenz und Lage auch immer noch eine sehr bestrittene Frage. Die Gefäßstämme der Iris sind ziemlich stark mit Muskelfasern belegt; außer diesen Fasern beschreiben verschiedene Anatomen verschiedene Fasersysteme, die sie als *Dilatator pupillae* betrachten, die dagegen von anderen wieder geleugnet werden.

J. HENLE. Handbuch der systematischen Anatomie des Menschen. II, 635. Braunschweig 1866.

§ 4. Die Netzhaut.

Die **Netzhaut** (*Retina*) ist eine flächenförmige Ausbreitung von Nervenmasse, im Hintergrunde des Auges zwischen Aderhaut und Glaskörper gelegen. Sie ist frisch ziemlich durchsichtig, an toten Augen weißlich trübe. Im Hintergrunde des Auges ist sie am dicksten (0,22 mm); man bemerkt hier etwas nach der Nasenseite zu die weiße Eintrittsstelle des Sehnerven (*d* in Fig. 2, S. 3) und etwas nach der Schläfenseite hinüber (bei *p*) einen gelben Fleck (*Macula lutea Retinae*), die Stelle des deutlichsten Sehens. Nach vorn zu wird die Netzhaut dünner (am vorderen Rande 0,09 mm) und endet da, wo die Ciliarfortsätze beginnen, mit einem gezackten Rande (*Ora serrata Retinae*), wenigstens hören hier ihre nervösen Elemente auf. Sie ist an dieser Stelle eng verbunden mit der Aderhaut und Glashaut (der Hülle des Glaskörpers), und die membranösen Gebilde, welche hier ihre anatomische Fortsetzung bilden (*Pars ciliaris Retinae* und *Zonula Zinnii*), haben eine ganz andere Struktur und physiologische Bedeutung.

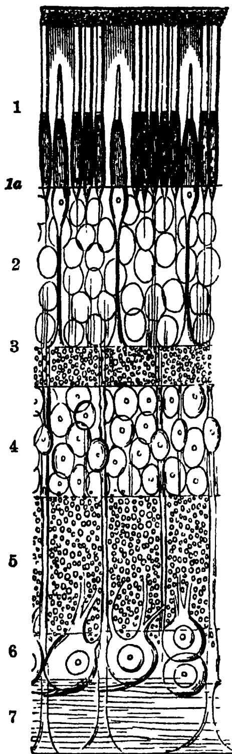


Fig. 14.

Die Netzhaut besteht teils aus den gewöhnlichen mikroskopischen Bestandteilen des Nervensystems, Nervenfasern, Ganglienkörpern, Kernen, teils aus eigentümlichen, den Stäbchen (*Bacilli*) und Zapfen (*Coni*). Fig. 14 stellt einen Durchschnitt der Schichten der Retina vom Äquator des Auges nach MAX SCHULTZE dar, in den Dimensionen geändert von SCHWALBE.[1] Die Schichten sind folgende in der Reihenfolge von außen nach innen:

1. **Stäbchenschicht** (Fig. 14, 1), gebildet aus den **Stäbchen und Zapfen**. Die ersteren sind Zylinder, 0,063 bis 0,081 mm lang und 0,0018 mm dick, von einer stark lichtbrechenden Substanz gebildet. Sie stehen palisadenförmig neben einander gedrängt, sind am äußeren Ende quer abgestutzt, am inneren laufen sie in einen feinen Faden aus, der in die nächste Schicht eintritt. Zwischen ihnen stehen die **Zapfen**; diese sind dicker (0,0045 bis 0,0065 mm) und kürzer als die Stäbchen, aus ähnlicher Substanz gebildet; ihr äußeres Ende läuft in ein gewöhnliches Stäbchen aus (**Zapfenstäbchen**), am inneren Ende hängen sie mit einem birnförmigen, kernhaltigen Körper zusammen, der durch eine leichte Einschnürung von ihnen getrennt ist, und schon in der folgenden Schicht liegt (**Zapfenkorn** nach KÖLLIKER, Kern der Zapfen nach VINTSCHGAU).

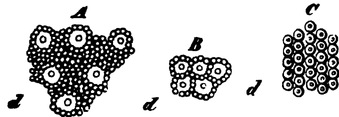


Fig. 15.

Die Zapfen stehen zwischen den Stäbchen zerstreut, an der Peripherie der Netzhaut sparsamer, nach dem gelben Fleck zu dichter. In diesem Flecke fehlen die Stäbchen ganz. In Fig. 15 zeigt *A* eine Flächenansicht der

[1] In der ersten Auflage war hier auf eine Figur nach KÖLLIKER, auf besonderer Tafel, verwiesen. Diese wurde in der zweiten Auflage schon von HELMHOLTZ selbst durch die obenstehende halbschematische Figur nach M. SCHULTZE ersetzt. N.

Stäbchenschicht vom Äquator des Auges, *B* vom Rande des gelben Flecks, *C* vom gelben Flecke. Die kleineren Kreise entsprechen den Stäbchen, die größeren den Zapfen, in ihnen sieht man den Querschnitt des Zapfenstäbchens. Wahrscheinlich ist diese Schicht diejenige, welche den Eindruck des Lichts wahrnimmt.

Die darauf folgenden Schichten der Netzhaut:

2. die äußere Körnerschicht (Fig. 14, 2). (Von der Stäbchen- und Zapfenschicht durch die *Membrana limitans externa*, *1a*, getrennt. N.)
3. die Zwischenkörnerschicht (Fig. 14, 3),
4. die innere Körnerschicht (Fig. 14, 4),
5. die feingranulierte Schicht (Fig. 14, 5),

bestehen aus den feinen Fasern, welche von den Stäbchen und Zapfen ausgehen (radiäre Fasern, Müllersche Fasern), eingebettet in eine feinkörnige Substanz und mannigfach verästelt. Zwischen ihnen liegen die Körner 0,004 bis 0,009 mm im Durchmesser, mit den Müllerschen Fasern verbunden.

6. Die Nervenzellenschicht (Fig. 14, 6), bestehend aus großen, mit vielen Ausläufern versehenen Nervenzellen oder Ganglienkörpern, von denen in Fig. 16 eine aus dem Auge des Elefanten nach Corti abgebildet ist. Jede enthält einen Kern (Fig. 16, *a*). Die Ausläufer gehen zum Teil über in Sehnervenfasern, zum Teil scheinen sie auch mit Müllerschen Fasern in Verbindung zu stehen. Diese Schicht ist im gelben Flecke am dicksten, sie enthält hier 8 bis 10 Zellen hintereinander; nach der Peripherie der Netzhaut hin wird sie dünner, und die Zellen bilden hier keine zusammenhängende Lage mehr.

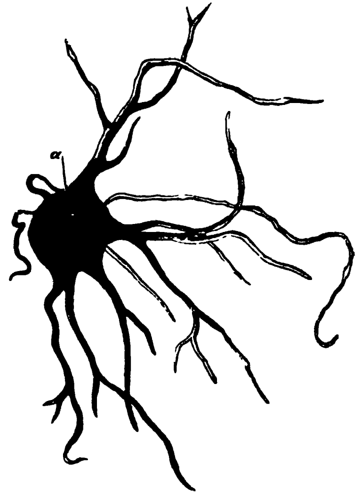


Fig. 16.

7. Die Ausbreitung des Sehnerven. Die Sehnervenfasern verbreiten sich von der Eintrittsstelle des Nerven aus radial über die ganze Netzhaut, mit Ausnahme des gelben Flecks, den sie umgehen. In der Umgebung des Nervenstamms ist diese Faserschicht natürlich am stärksten (0,2 mm), nach den Grenzen der Netzhaut hin wird sie dünner (am Rande 0,004 mm). Die Fasern gehören zu den sehr feinen Nervenfasern, welche nach dem Tode gewöhnlich perlschnurartig auftreiben. Ihre Dicke ist sehr verschieden (0,0005 bis 0,0045 mm); über ihre Endigungen weiß man noch nichts Bestimmtes. Einige verbinden sich mit den Ausläufern der Nervenzellen, wahrscheinlich ist das mit allen der Fall.

Zwischen den Nervenfasern dieser Schicht laufen auch noch die inneren Enden der Müllerschen Fasern hindurch, welche sich hier baumförmig verästeln. Ihre letzten Enden heften sich an eine glashelle Membran, welche die Netzhaut von innen abschließt, die *Membrana limitans interna*.

Der gelbe Fleck, für das Sehen der wichtigste Teil der ganzen Netzhaut, unterscheidet sich von den übrigen Teilen durch seine gelbe Farbe, welche von einem alle Teile mit Ausnahme der Stäbchenschicht durchdringenden Pigmente herrührt. Ihm fehlt die Nervenfaserschicht, und in der Stäbchenschicht

finden sich nur Zapfen. In seiner Mitte befindet sich eine sehr durchsichtige vertiefte Stelle, die Netzhautgrube (*Fovea centralis*), welche leicht einreißt und daher zuweilen für eine Öffnung gehalten wurde. Die Nervenzellenschicht ist am Umfang des gelben Flecks stärker als in sämtlichen übrigen Teilen der Netzhaut, in der *Fovea centralis* wird sie aber wieder dünner und enthält nur wenige Lagen von Zellen übereinander; die granulöse Schicht fehlt vielleicht in der Mitte ganz. Die innere Körnerschicht und Zwischenkörnerschicht nehmen gegen den gelben Fleck hin bedeutend zu, während die äußere Körnerschicht dünner wird. In der Netzhautgrube verdünnt sich nach H. Müller auch die innere Körnerschicht. Nach Remak und Kölliker fehlen in der *Fovea centralis* alle Schichten außer den Nervenzellen und Zapfen. Zwischen letzteren und der Aderhaut soll nach Remak hier eine intensiv gelbe glashelle Substanz liegen.

Die Verhältnisse des gelben Flecks sind trotz ihrer Wichtigkeit doch noch in vieler Beziehung nur unsicher bekannt, weil er bisher nur im menschlichen Auge gefunden worden ist, und die zarten Teile bald nach dem Tode zerreißen, so daß alle feineren Untersuchungen dieser Stelle an den Augen von Hingerichteten angestellt werden mußten, wozu natürlich nur selten Gelegenheit ist.

Auch bei der Untersuchung mit dem Augenspiegel markiert sich die Netzhautgrube durch einen besonderen Lichtreflex (s. § 16). Sie enthält den Punkt des direkten Sehens, d. h. auf ihr wird der Punkt des Gesichtsfeldes abgebildet, auf welchen wir den Blick richten.



Fig. 17.

Die Gefäße der Netzhaut treten in der Mitte des Sehnerven in das Auge (*Arteria* und *Vena centralis Retinae*) und verästeln sich von da aus baumförmig nach allen Richtungen. Anfangs liegen sie nahe unter der *Membrana limitans*, in der Schicht der Sehnervenfasern, später dringen sie auch in die der Nervenzellen und in die feingranulierte Schicht ein, und verästeln sich in diesen beiden Schichten in ein weitmaschiges Kapillargefäßnetz. Die Lage und Form dieses Gefäßbaums ist für gewisse optische Erscheinungen wichtig[1]; ich gebe deshalb in Fig. 17 eine Abbildung desselben, welche von Donders nach einem Injektionspräparate gefertigt worden ist. Die Arterien sind hell, die Venen dunkel. In den gelben Fleck treten keine stärkeren Gefäße, in die Netzhautgrube auch keine Kapillargefäße ein. Die letztere ist von einem Kranz von Endschlingen kapillarer Gefäße umgeben.

An dem vorderen Rande (*Ora serrata*) geht die Netzhaut in eine Lage von Zellen über (*Pars ciliaris Retinae*), welche zugleich mit der sich ebenfalls fortsetzenden *Membrana limitans* (int.) die Ciliarfortsätze und die hintere Fläche der Iris, wo sie in Pigmentzellen überzugehen scheinen, überziehen, und diesen Teilen fest anhaften.

[1] S. unten § 15.

Da die Größenverhältnisse der Netzhaut und ihrer Elemente für sehr viele optische Erscheinungen von großer Wichtigkeit sind, gebe ich hier eine Zusammenstellung darauf bezüglicher Messungen verschiedener Beobachter, auf Millimeter reduziert. Ich bezeichne die Messungen von C. Krause mit *Kr.*, von E. H. Weber mit *W.*, von Brücke mit *B.*, von Kölliker mit *Ko.*, von Vintschgau mit *V.*

Durchmesser der Eintrittsstelle des Sehnerven *Kr.* 2,7 und 2,14. *W.* 2,09 und 1,71.

Durchmesser des Gefäßstrangs darin *W.* 0,704 und 0,63.

Entfernung der Mitte des Sehnerven von der Mitte des gelben Flecks *W.* 3,8. *Kr.* 3,28 und 3,6. Vom inneren Ende des gelben Flecks *Ko.* 2,25 bis 2,7.

Horizontaler Durchmesser des gelben Flecks *Kr.* 2,25. *W.* 0,76. *Ko.* 3,24.

Vertikaler desgl. *Ko.* 0.81.

Durchmesser der Netzhautgrube *Ko.* 0,18 bis 0,225.

Entfernung der *Ora serrata* vom Rande der Iris an der Nasenseite *B.* 6. an der Schläfenseite 7.

Dicke der Netzhaut am Umfang des Sehnerven *Ko.* 0,22.

Desgl. an der hinteren Seite des Augapfels *Kr.* 0,164. *Ko.* 0,135.

Desgl. am Äquator *Kr.* 0,084.

Desgl. am vorderen Rande *Ko.* 0,09.

Dicke der Schichten im gelben Flecke. *Ko.*: Nervenzellen 0,101 bis 0,117; feinkörnige Schicht 0,045; innere Körnerschicht 0,058; Zwischenkörnerschicht 0,086; äußere Körnerschicht 0,058; Zapfen 0,067.

Durchmesser der Nervenzellen *B.* 0,01 bis 0,02. *Ko.* 0,009 bis 0,036, in der Regel zwischen 0,013 und 0,022.

Durchmesser der Körner *B.* 0,006 bis 0,008. *Ko.* 0,004 bis 0,009. Der Zapfenkern *V.* 0,0068.

Durchmesser der Stäbchen *B.* und *Ko.* 0,0018. *V.* 0,0010.

Länge der Stäbchen *B.* 0,027 bis 0,030. *Ko.* 0,063 bis 0,081.

Durchmesser der Zapfen *Ko.* 0,0045 bis 0.0067. *V.* 0,0034 bis 0,0068. Im gelben Flecke *Ko.* 0,0045 bis 0,0054.

Länge der Zapfen *V.* 0,015 bis 0,020.

Die neueren Hauptwerke über Struktur der Netzhaut sind:

1845. F. Pacini in *Nuovi Annali delle scienze nat. di Bologna.* 1845.
1851. H. Müller in Siebold und Köllikers Zeitschrift für wiss. Zoologie. 1851. S. 234. — Verhandl. der Würzburger med. Ges. 1852. S. 216. Ibid. III. 336 und IV. 96.
1850. Corti in J. Müllers Archiv. 274. — Zeitschr. für wissensch. Zoologie. V. — J. Henle in Zeitschr. für ration. Medizin. N. F. II. 304 u. 309.
1852. A. Kölliker Verhandl. der Würzburger med. Ges. III. S. 316*.
1853. A. Kölliker u. H. Müller *C. R. de l'Acad. d. Sc.* 1853. Septb. 23. — *Von denselben die Retinatafel in Ecker Icones physiologicae*.
R. Remak in *C. R. de l'Acad. d. Sc.* 1853. Okt. 31. und Allgem. med. Zentralz. 1854. Nr. 1*. Prager Vierteljahrsschr. XLIII. S. 103.
M. di Vintschgau in Sitzber. d. Wiener Akad. XI. 943.
1854. *A. Kölliker Mikroskopische Anatomie. Leipzig 1854. II. 648—703*.
Einige Messungen sind entnommen aus:
C. Krause, Handbuch der menschlichen Anatomie. Hannover 1842. I, 2. S. 535*.
E. Brücke, Anat. Beschr. d. menschl. Augapfels. Berlin 1847. S. 23.
E. H. Weber in Sitzber. d. Sächs. Ges. d. Wiss. 1852. S. 149—152.

Nachtrag (aus der ersten Auflage S. 822ff. 1867).

Die feinere Anatomie der Netzhaut hat die Anatomen noch viel beschäftigt und ist beträchtlich verfeinert worden. J. Henle unterscheidet in der neuesten Zusammenfassung der von ihm selbst und anderen Beobachtern erhaltenen Resultate folgende Schichten:

Musivische Schicht		1. Stäbchenschicht 2. Äußere Limitans 3. Körnerschicht.
Äußere Faserschicht		4. Äußere Faserschicht.
Nervöse Schicht	Graue Substanz	5. Äußere granulierte Schicht 6. Äußere gangliöse Schicht 7. Innere granulierte Schicht 8. Innere gangliöse Schicht
	Weiße Substanz	9. Nervenfaserschicht
Grenzmembran		10. *Limitans hyaloidea.*

Davon vertritt 1 die Stäbchenschicht, 3 die äußere Körnerschicht, 4 und 5 die Zwischenkörnerschicht, 6 die innere Körnerschicht, 7 die feingranulierte Schicht, 8 Nervenzellenschicht, 9 die Ausbreitung des Sehnerven der oben S. 23 gegebenen Aufzählung.

Die Stäbchen der hintersten Netzhautschicht sind selbst aus je zwei stäbchenförmigen Gliedern zusammengesetzt, von denen das innere aus einer schwächer lichtbrechenden Substanz besteht und dicker ist (0,0018 bis 0,0022 mm Durchmesser) als das äußere stärker lichtbrechende (0,0013 bis 0,0018 Durchmesser). Die inneren Abteilungen der Stäbchen liegen in gleichem Niveau mit den dickeren flaschenförmigen Innengliedern der Zapfen, deren äußere Abteilungen, die oben schon erwähnten Zapfenstäbchen, mit den äußeren Abteilungen der Stäbchen in einer Reihe liegen, aber kürzer sind als diese und deshalb nicht so weit gegen die Aderhaut reichen. Der Durchmesser des dickeren inneren Teils der Zapfen steigt bis 0,004 und 0,006 mm; nur in der Netzhautgrube, wo zwischen den Zapfen keine Stäbchen mehr stehen, sind die Zapfen dünner (inneres Ende 0,002 bis 0,0025 mm nach M. Schultze, in einem kleinen Bezirk 0,0015 bis 0,002 nach H. Müller, zwischen 0,0031 und 0,0036 nach Welcker). Die Zapfen des gelben Flecks zeichnen sich außerdem nach M. Schultze durch eine fast doppelt so große Länge vor denen der übrigen Netzhaut aus.

Die Körnerschicht (äußere Körnerschicht) enthält nach Henle in vielen Schichten übereinander ellipsoidische Körner, die im frischen Zustande eine eigentümliche, sehr zierliche Querstreifung zeigen. Jedes Korn zeigt in der Regel drei hellere Bänder, die durch dunklere getrennt und der optische Ausdruck von Schichten zweier abwechselnder Substanzen sind, die der Fläche der Netzhaut parallel das Korn durchziehen. An gut erhärteten Präparaten sieht man diese Körner in regelmäßigen Reihen, die senkrecht zur Netzhautfläche sind, übereinander geschichtet. Sie verhalten sich auch gegen Reagenzien wesentlich anders als die Nervenzellen, so daß sie von diesen durchaus zu unterscheiden sind. Ihre längere Achse, welche senkrecht zur Fläche der Netzhaut steht, mißt 0,006 bis 0,007 mm, die kleinere Achse mitunter nicht viel mehr als die Hälfte.

In die Körnerschicht ragen auch hinein die oben schon erwähnten Zapfenkörner, welche einen Kern enthalten und sich nach innen hin in eine zylindrische glatte glänzende Faser von 0,0015 mm Durchmesser fortsetzen, welche durch die Dicke der Körnerschicht zu verfolgen ist, und dann bald mit, bald ohne eine zellenähnliche Anschwellung an die äußere granulierte Schicht tritt.

Hier scheint sich dieselbe nach M. SCHULTZE in eine große Zahl feinster Fasern aufzulösen, die in die äußere granulierte Schicht eintreten und dann nicht weiter zu verfolgen sind. Von den Stäbchen gehen ebenfalls feine Nervenfasern ab, mit denen die Körner der äußeren Körnerschicht zusammenhängen und welche den Zapfenfasern entsprechen, nur viel feiner sind als diese. Auch diese haben eine Anschwellung, wo sie an die äußere granulierte Schicht stoßen, und lassen sich in diese hinein nicht verfolgen.

Eine besondere Faserschicht (äußere Faserschicht HENLE) ist in der Regel nur in und um den gelben Fleck und an der *Ora serrata* der Netzhaut, also längs ihres äußeren Randes zu erkennen. Die Fasern des gelben Flecks laufen radial, von dem Zentrum der Netzhautgrube als Mittelpunkt aus divergierend, nach allen Seiten, und laufen hauptsächlich der Fläche der Netzhaut parallel, indem sie teils bündelweise aus der Körnerschicht aufsteigen und an die horizontal streichenden Faserzüge sich anschließen, teils von diesen sich loslösend in die äußere granulierte und Nervenzellenschicht sich einsenken. Diese Fasern stellen wahrscheinlich die Verbindung zwischen den Zapfen der Netzhautgrube und den in ihrer Umgebung massenhaft angehäuften Nervenzellen her; freilich macht es die große Menge der genannten Fasern nach HENLEs Meinung zweifelhaft, ob alle einem solchen Zwecke dienen. Welche Rolle diese Fasern wahrscheinlich bei der Erzeugung von HAIDINGERs Büscheln im polarisierten Lichte spielen, ist im § 25 auseinandergesetzt.

An den übrigen vorderen Schichten der Netzhaut sind wesentlich neue Verhältnisse nicht aufgefunden worden. Ein großer Teil der radiären, MÜLLERschen Fasern, namentlich die, welche mit der *Membrana limitans hyaloidea* verschmelzen, sind jedenfalls Bindegewebfasern. Über den Verlauf der eigentlichen Nervenfasern, die nach MAX SCHULTZE an ihrem perlschnurähnlichen Ansehen erkannt werden können, ist mit Ausnahme ihres Verlaufs in der vordersten Schicht der Netzhaut, der Ausbreitung des Sehnerven, noch nichts Vollständiges bekannt.

Im Grunde der Netzhautgrube verschmelzen die beiden Nervenzellenschichten miteinander und mit der Körnerschicht, hinter diesen liegen die Zapfen, alle andern Schichten fehlen.

1856. H. MÜLLER. Anatomische Beiträge zur Ophthalmologie. Archiv für Ophthalmologie. II, 2. S. 1. III, 1. S. 1. IV, 1. S. 269.

— Derselbe. Anatomisch-physiologische Untersuchungen über die Retina bei Menschen und Wirbeltieren. SIEBOLD und KÖLLIKERs Zeitschrift für wissensch. Zoologie. VIII, 1. *C. R.* XLIII. Okt. 20.

1857. C. BERGMANN. Anatomisches und Physiologisches über die Netzhaut des Auges. Zeitschr. für rationelle Medizin. (3) II. 83.

1858. NUNNELEY. *On the structure of the retina. Quarterly Journal of microscop. science.* 1858. Juli. 217.

1859. RITTER. Über den Bau der Stäbchen und äußeren Endigungen der Radialfasern an der Netzhaut des Frosches. Archiv für Ophthalm. V, 2. S. 101.

— M. SCHULTZE. *De retinae structura penitiori. Bonn.*

1859. E. v. WAHL. De retinae textura in monstro anencephalo. Dissert. Dorpat.

1860. W. MANZ. Über den Bau der Retina des Frosches. Zeitschr. für ration. Medizin. (3) X, 301.

— G. BRAUN. Eine Notiz zur Anatomie und Bedeutung der Stäbchenschichte der Netzhaut. Wiener Sitzungsber. XLII, 15—18.

— W. KRAUSE. Über den Bau der Retinastäbchen beim Menschen. Göttinger Nachrichten. 1861. Nr. 2. Zeitschr. für ration. Medizin. (3) XI, 175.

1861. M. Schultze. Sitzungsber. der niederrheinischen Ges. 1861. S. 97. Archiv für Anatomie und Physiol. 1861. S. 785. Archiv für mikrosk. Anatomie. II, 175—286.
— Ritter im Archiv für Ophthalm. VIII, 1.
1862. H. Müller. Bemerkungen über die Zapfen am gelben Fleck des Menschen. Würzburger naturwiss. Zeitschr. II, 218.
— Derselbe. Über das Auge des Chamäleon. Ebenda. III, 10.
1863. Schiess. Beitrag zur Anatomie der Retinastäbchen. Zeitschr. für ration. Medizin. (3) XVIII, 129.
— H. Welcker. Untersuchung der Retinazapfen bei einem Hingerichteten. Ebenda. XX, 173.
— W. Krause. Ebenda. XX, 7.
1865. Blessig. De Retinae textura. Dissert. Dorpat.
1866. J. Henle. Handbuch der systematischen Anatomie des Menschen. II, 636—670.

§ 5. Die Kristallinse.

Die Kristallinse ist ein durchsichtiger, farbloser, bikonvexer Körper, dessen vordere Fläche weniger gewölbt ist als die hintere. Sie wird umschlossen von einer strukturlosen glashellen Membran (Linsenkapsel), welche in allen Eigenschaften der Descemetschen Membran entspricht; auch trägt sie, wie diese, vorn, wo sie von der wäßrigen Feuchtigkeit bespült wird, nach Brücke ein Epithelium, welches Henle und Kölliker dagegen leugnen. Ihre hintere Hälfte ist mit der Glashaut verwachsen. Die Substanz der Linse ist in den äußeren Schichten von gallertartiger Konsistenz, in der Mitte oder dem Kerne der Linse dagegen konsistenter. Das Ganze bildet in frischem Zustande einen elastischen Körper, der jeder äußeren Gewalt zwar leicht nachgibt, aber auch schnell und vollkommen seine frühere Form wieder annimmt.

Die Substanz der Linse ist doppeltbrechend. Wenn man sie zwischen zwei

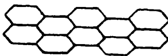


Fig. 18.

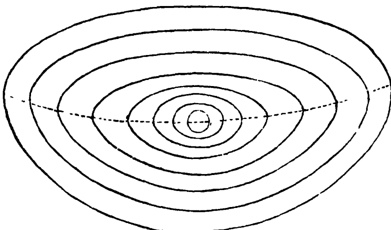


Fig. 19.

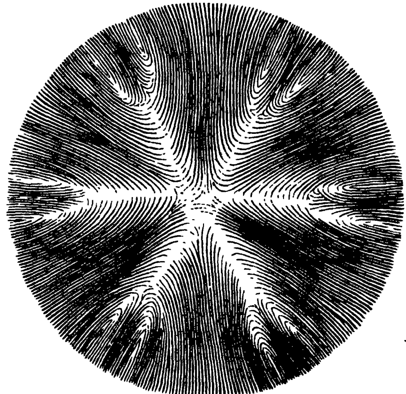


Fig. 20.

gekreuzten Nicolschen Prismen betrachtet, sieht man das schwarze Kreuz mit farbigen Ringen, welches senkrecht zur optischen Achse geschnittene einachsige Kristalle zeigen.

Die Masse der Linse besteht aus einem eigentümlichen Proteinkörper, dem Globulin oder Kristallin. Ihre mikroskopischen Elementarteile sind Fasern von sechsseitigem Querschnitt, 0,0056 bis 0,0112 mm breit, 0,002 bis 0,0038 mm dick, im Kerne fester und schmaler als in den äußeren Schichten. Ihre breitere Fläche liegt der Oberfläche der Linse parallel, daher die Linse auch leicht in

dieser Richtung in zwiebelartig übereinanderliegende Schichten spaltet. Fig. 18 zeigt die Querschnitte der Fasern in ihrer Zusammenlagerung, Fig. 19 zeigt die Richtung der Schichten in einem Durchschnitte der Linse. Die Fasern haben im allgemeinen in jeder einzelnen Schicht die Richtung von der Achse der Linse nach ihrer Peripherie hin. Nur in den der Achse näheren Teilen bilden sie, indem sie umbiegen, eigentümliche sternförmige Figuren, wie eine solche aus den äußeren Linsenschichten in Fig. 20 abgebildet ist. In den Kernschichten hat der Stern nur drei Strahlen, welche miteinander Winkel von 120° machen. Die Sterne der hinteren und vorderen Fläche sind um 60° gegeneinander gedreht. In den äußeren Schichten spalten sich dagegen die drei Hauptstrahlen der Sterne vielfach in Nebenstrahlen, so daß viel verwickeltere und unregelmäßigere Figuren entstehen.

Dicht unter der Kapsel liegt statt der Fasern eine Zellenschicht, welche nach dem Tode zerfließt und dann den *Liquor Morgagnii* bildet. Ähnliche Zellen verbinden nach Brücke auch die Faserenden in den Strahlen der Sterne wenigstens in den äußeren Schichten, während Bowman und Kölliker hier eine strukturlose Substanz annehmen. Letzterer erklärt auch die zellenähnlichen Gebilde an der hinteren Linsenfläche für geschwollene und sich gegenseitig abplattende Enden der Linsenfasern, welche sich hier an die Kapsel hefteten. In jeder Hälfte der Linse existieren also drei durch die Achse gehende Ebenen, die den Hauptstrahlen der Sterne entsprechen (*central planes*, Bowman), in denen die Struktur der Linse abweichend ist; in den oberflächlichen Schichten teilen sich diese Flächen noch weiter. Es hängen damit wahrscheinlich gewisse Unregelmäßigkeiten in der Brechung der Lichtstrahlen zusammen.

Über den Faserverlauf in der Linse sind wir noch keineswegs im klaren. Thomas[1] hat eigentümliche Figuren beschrieben, welche die Faserenden auf Durchschnittsflächen getrockneter Linsen bilden, und welche meist aus zwei Systemen konzentrischer Kreise bestehen. Diese lassen sich aus dem, was bisher über den Faserverlauf der Linse bekannt ist, noch nicht erklären.

Krause erkärt infolge seiner Messungen an der Linse ihre Vorderfläche für ein Stück eines abgeplatteten Rotationsellipsoides, die hintere für ein Rotationsparaboloid. Er gibt folgende Werte der einzelnen Konstanten für die acht in § 2 erwähnten Augen in Pariser Linien:

Nr.	Achse der ganzen Linse	Achse der vorderen Hälfte	Achse der hinteren Hälfte	Vorderfläche. Halbe Achse der Ellipse große	Vorderfläche. Halbe Achse der Ellipse kleine	Vorderfläche. Entfernung von der Hornhaut	Hinterfläche Parameter	Hinterfläche Entfernung von der Netzhaut	Durchmesser
I.	2	0,85	1,15	2,05	0,95	1,2	4,49	6,65	4,1
II.	1,9	0,78	1,1	2	0,91	1,35	4,99	6,8	4
III.	2,4	0,98	1,42	2	1,14	1,25	4,99	6,1	4,1
IV.	2,2	0,95	1,25	2,05	1,10	1,35	4,51	5,9	4,1
V.	1,85	0,65	1,2	2,03	0,83	1,25	4,83	6,4	4
VI.	2,35	0,8	1,55	1,95	0,98	1,2	4,53	6,0	4,1
VII.	1,8	0,78	1,02	2,03	0,95	1	4,09	6,65	4
VIII.	1,85	0,85	1	2	0,94	1	3,79	6,55	4

Ich habe Krauses Angaben über die Entfernung der Linsenflächen von der Hornhaut und Netzhaut hier mit angegeben, habe aber schon früher bemerkt, daß ich ihre

[1] Thomas, Prager mediz. Vierteljahrsschr. 1854. Bd. I. Außerord. Beilage S. 1.

Richtigkeit für sehr zweifelhaft halte. Auch in Beziehung auf die Dicke der Linse stimmen meine an lebenden Augen angestellten Messungen nicht mit denen an toten Linsen. Da die Dicke der Linse übrigens beim Sehen in der Nähe und Ferne sich verändert, werde ich meine darauf bezüglichen Untersuchungen erst bei der Lehre von der Akkommodation § 12 auseinandersetzen.

Über den Bau der Linse:

1845. A. Hannover in J. Müllers Archiv. 1845. S. 478*.
1846. Harting in van de Hoeven en de Vriese Tijdschrift XII. S. 1.
1847. *E. Brücke, Beschr. d. menschl. Augapfels. Berlin. S. 27—30*.
1849. W. Bowman, *Lectures on the parts concerned in the oper. on the eye.* London.
1851. H. Meyer in J. Müllers Archiv 1851. 202*.
1852. Gros in *C. R. de l'Acad. d. Sciences.* 1852. Avril.
1852. D. Brewster. *On the development and extinction of regular doubly refracting structures in the cristalline lenses of animals after death. Phil. Mag.* (4) III, 192—193.
1854. *A. Kölliker, Mikroskopische Anatomie. Leipzig. II. 702—713*.
Thomas in Prager med. Vierteljahrsschrift. 1854. Bd. 1. Außerord. Beil. S. 1*.
1859. G. Valentin. Neue Untersuchungen über die Polarisationserscheinungen der Kristalllinsen des Menschen und der Tiere. Archiv für Ophthalm. IV, I, 227—268.
— D. Brewster, *On certain abnormal sructures in the crystalline lenses of animals and in the human crystalline. Rep. of Brit. Assoc.* 1858. 2, p. 7.
1863. F. J. v. Becker. Über den Bau der Linse bei dem Menschen und den Wirbeltieren. Archiv für Ophthalm. IX (2), 1—42.

§ 6. Wässrige Feuchtigkeit und Glaskörper.

Die wässrige Feuchtigkeit (*Humora queus*) füllt den Raum zwischen der Hornhaut, Iris und Linse aus. Den Raum, welcher zwischen der hinteren Fläche der Hornhaut, der vorderen Fläche der Iris und der Pupillarebene liegt, nennt man die vordere Augenkammer. Den Raum dagegen, den man zwischen der Pupillarebene, der hinteren Fläche der Iris und der vorderen Fläche der Linse vorhanden glaubte, nannte man hintere Augenkammer; indessen ist dies in der Tat im normalen Zustande nur eine kapillare Spalte, indem die hintere Fläche der Iris der vorderen der Linse dicht anliegt. Nur bei starker künstlicher Erweiterung der Pupille durch Belladonna scheint sich die Iris von der Linse zu entfernen.

Die wässrige Feuchtigkeit füllt also die vordere Augenkammer. Sie ist klar, farblos und besteht aus Wasser, welches etwa 2 Proz. fester Stoffe, nämlich Kochsalz und Extraktivstoffe, enthält. Sein Brechungsverhältnis ist kaum von dem des Wassers unterschieden.

Der Raum des Augapfels, welcher zwischen der Linse und der Netzhaut liegt, ist vom Glaskörper (*Corpus vitreum, Humor vitreus*) ausgefüllt, welcher von der Glashaut (*Membrana hyaloidea*) umschlossen wird. Der Glaskörper bildet eine gallertartige Masse von wenig Zusammenhang. Wenn man ihn zerschneidet, tropft eine dünne, nicht Faden ziehende Flüssigkeit aus. Diese reagiert alkalisch, und enthält 1,69 bis 1,98 Proz. feste Teile, von denen die Hälfte aus unorganischen Stoffen (Kochsalz, wenig kohlensaures Natron, Spuren von Kalk, Schwefelsäure und Phosphorsäure) besteht. Der organische Teil des Inhalts scheint hauptsächlich Schleimstoff zu sein, und enthält Spuren einer Proteinverbindung. Auch das Brechungsverhältnis des Glaskörpers unterscheidet sich kaum von dem des Wassers, ist aber etwas höher als das der wässrigen Feuchtigkeit.

Bei Embryonen hat der Glaskörper einen zelligen Bau, später aber findet man von den Zellen nur einzelne Reste, Membranen, Körnerchen, körnige Massen, welche sich darin, wenn auch nicht ganz frei, bewegen. Seine Konsistenz verdankt der Glaskörper wahrscheinlich einer geringen Menge einer stark aufgequollenen organischen Substanz (Schleimstoff oder Faserstoff). Geringe Mengen Faserstoff, welche sich aus hydropischen Flüssigkeiten abscheiden, geben oft ähnliche leicht bewegliche Gallerten, aus denen die Flüssigkeit ausläuft, wenn man den Zusammenhang des Gerinnsels mechanisch zerstört. Läßt man den Glaskörper in Reagenzien, welche den Schleimstoff niederschlagen, z. B. in Lösungen von essigsaurem Bleioxyd oder Chromsäure erhärten, so findet man auf Durchschnitten zuweilen regelmäßige Streifungen, von denen es aber noch höchst zweifelhaft ist, ob sie Membranen entsprechen, welche sich durch den Glaskörper hinziehen.

Hannover nimmt auf Grund dieser Streifungen an, daß im menschlichen Glaskörper ebene Membranen vorkommen, und sich alle in einer Linie schneiden, die von der Eintrittsstelle des Sehnerven nach der hinteren Fläche der Linse hinübergeht, und daß die Membranen sich von dieser Linie nach dem äußeren Umfang des Glaskörpers hinüberziehen und dort ansetzen, so daß der Bau des Glaskörpers ähnlich dem einer Apfelsine sein würde.

Bei den entoptischen Erscheinungen werde ich die Schlüsse besprechen, welche man daraus auf die Struktur des Glaskörpers machen kann.

Die Glashaut ist eine sehr feine, glashelle, strukturlose Membran, welche im hinteren Teile des Auges der *Membrana limitans interna* der Netzhaut anliegt, und ihr im Leben überall[1], nach dem Tode nur an der Eintrittsstelle des Sehnerven und an der *Ora serrata* fest anhaftet. Von der *Ora serrata* setzt sie sich, dünner geworden, fort bis zur hinteren Fläche der Linsenkapsel, mit der sie verschmilzt (Fig. 2, S. 3 *k*), während sich zwischen sie und den Ciliarteil der Netzhaut noch eine andere Membran einschiebt, die *Zonula Zinnii* (*Ligamentum suspensorium lentis*), welche von manchen Anatomen als ein vorderes Blatt der Glashaut bezeichnet wird.

Die Zonula ist wie eine Halskrause gefaltet, so daß sie der Oberfläche der Ciliarfortsätze folgt. Der vordere oder äußere Rand ihrer Falten liegt fest mit der *Membrana limitans* verbunden in der Tiefe zwischen den Falten der Ciliarfortsätze, der hintere oder innere Rand ihrer Falten, welcher den Gipfeln der Ciliarfortsätze entspricht, nähert sich der Glashaut. In Fig. 2 ist die Zonula durch die Linie *e* bezeichnet. Rechts fällt sie zwischen zwei Ciliarfortsätze, links zieht sie über den Gipfel eines solchen Fortsatzes hin. In dieser Weise gelangt sie zum Rande der Linse, und setzt sich in einer gewellten Linie an deren Kapsel fest. In Fig. 21 ist ein Quadrant der Linse, projiziert auf eine durch die Achse *ab* der Linse gelegte Ebene, dargestellt. Die Ansatzlinie der Glashaut ist mit *cd* bezeichnet. Davor sieht man die gezackte Ansatzlinie der Zonula.

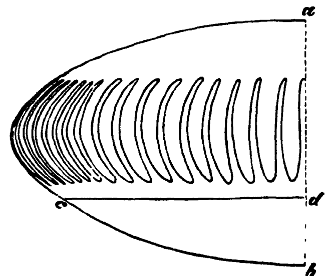


Fig. 21.

[1] Vintschgau in Sitzber. d. Wiener Akad. XI. 943 u. Burow in J. Müllers Archiv. 1840.

Der spaltenförmige Raum zwischen der Zonula und Glashaut wird *Canalis* Petiti genannt. Wenn man ihn aufbläst, nachdem man die Zonula von vorn frei gelegt hat, treten die eingestülpten Falten der Zonula gewölbt heraus, und das Ganze bekommt das Ansehen einer ionischen Eierleiste; daher nannte ihn sein Entdecker Petit auch *Canal godronné*. Bei stärkerem Blasen zerreißen die hervorgestülpten Teile der Membran, und es bleiben nur die vorderen Faltenränder wegen ihrer größeren Festigkeit als Stränge stehen, welche die Linse an den Glaskörper anheften. Diese vorderen Faltenränder sind übrigens fest verbunden mit dem Ciliarteile der Netzhaut, der in der Tiefe zwischen den Ciliarfortsätzen hinzieht, und letzterer haftet wieder der Pigmentschicht fest an. Hier finden sich auch Faserzüge vor, welche nach Brücke aus den Fasern herstammen, zwischen welche die Nervenzellen der Netzhaut eingebettet sind. Diese drängen sich in der *Ora serrata* an den Stellen zusammen, die den Zwischenräumen je zweier Ciliarfortsätze entsprechen, und ziehen im Grunde dieser Zwischenräume nach vorn. Die Zonula selbst erklärt Brücke für eine strukturlose Membran, während Henle und Kölliker sie selbst für faserig erklären. Gegen Reagenzien sind die Zonula und ihre Fasern so resistent wie elastisches Gewebe.

Die Zonula sichert die Stellung der Linse, indem sie diese an den Ciliarkörper heftet. und kann auch, wenn sie gespannt ist, auf den Äquatorialrand der Linse einen Zug ausüben, welcher die Äquatorialdurchmesser der Linse verlängert, ihre Dicke in der Achse verringert, und ihre Flächen abplattet.

Über den Bau des Glaskörpers:

Pappenheim, Spezielle Gewebelehre des Auges. 1842. S. 181.
E. Brücke in J. Müllers Archiv. 1843. S. 345 und 1845. S. 130.
Hannover ebendas. 1845. S. 467 und in: Das Auge. Leipzig 1852.
Bowman in *Dublin Quarterly Journal of Med. Science*. 1848. Aug.; auch in *Lectures on the Parts conc. in the oper. on the eye*. London 1849. p. 94.
*E. Brücke, Beschr. d. menschl. Augapfels. Berlin 1847.
Virchow in Verhandl. d. Würzburger phys. med. Ges. II. 1851. 317 und in Archiv für pathol. Anat. IV. 468 u. V. 278.
*Kölliker, Mikrosk. Anatomie II. 713.
Donders en Jansen in Nederlandsch Lancet 1846. II. 454.
*A. Doncan, De corporis vitrei structura. Dissert. Utrecht 1854. Abgedr. in Onderzoekingen ged. in het physiol. Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. S. 172.

§ 7. Umgebung des Auges.

Der Augapfel liegt, in lockeres Fettzellgewebe eingebettet, in der knöchernen Augenhöhle (*Orbita*). Diese hat eine nahehin kegelförmige Gestalt. Die Grundfläche des Kegels ist die vordere Öffnung der Orbita in der Gesichtsfläche, die Spitze des Kegels liegt nach hinten und etwas nach einwärts. In Fig. 22 ist die Lage der Augen in den beiden Augenhöhlen dargestellt. Aus der hinteren Seite des Augapfels rechts sieht man den Sehnerven *n* hervortreten, welcher durch ein in der Spitze der Augenhöhle gelegenes Loch *o* (*Foramen opticum*) in die Schädelhöhle eintritt, um sich hier bei *m* im *Chiasma nervorum opticorum* mit dem der anderen Seite zu vereinigen und zu kreuzen. Die Fortsetzungen der Sehnerven vom Chiasma bis zum Gehirn nennt man die *Tractus optici*. Die Fasern eines jeden *Tractus opticus* gehen teils in den Sehnerven derselben, teils in den der entgegengesetzten Seite über, ein kleiner Teil auch durch den

Tractus opticus der anderen Seite nach dem Gehirne zurück. Auch haben einige Beobachter Fasern gefunden, welche von dem einen Sehnerven durch das Chiasma in den anderen übergehen.

In der Augenhöhle liegen ferner sechs zur Bewegung des Augapfels bestimmte Muskeln, nämlich

1. der innere gerade *i* und

2. der äußere gerade *a*. Beide entspringen am Umfange des *Foramen opticum* in der Spitze der Augenhöhle, und setzen sich an die innere und äußere Seite des Augapfels. Sie drehen ihn um seine vertikale Achse.

3. Der obere gerade in Fig. 22 rechts weggenommen, um den Sehnerven zu zeigen, links mit *s* bezeichnet, und

4. der untere gerade, welcher ebenso auf der unteren Seite der Orbita

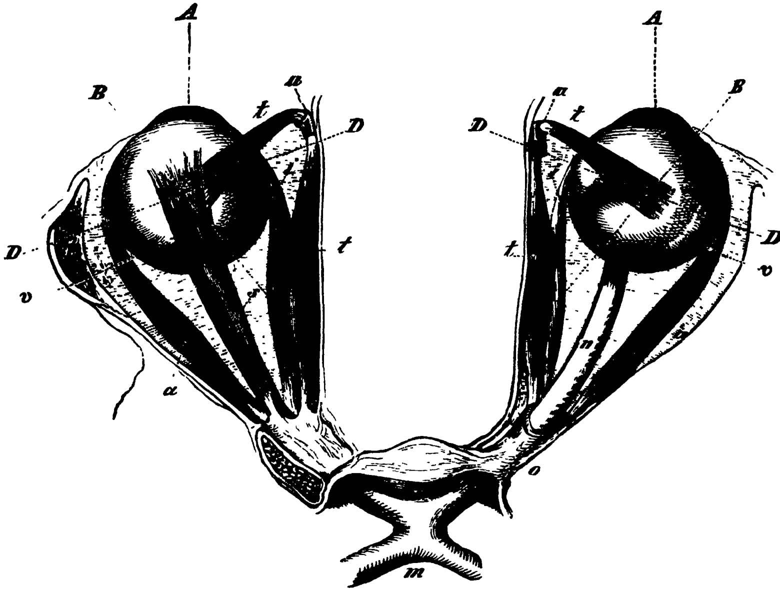


Fig. 22.

liegt, wie der obere hier auf der oberen sichtbar ist. Sie entspringen ebenfalls vom Umfange des *Foramen opticum* und heften sich an die obere und untere Seite des Augapfels. Sie drehen ihn um eine horizontale Achse, welche von der Nasenseite und etwas nach vorn herübergeht nach der Schläfenseite und etwas nach hinten, und in Fig. 22 mit *DD* bezeichnet ist. Diese Achse bildet einen Winkel von etwa 70° mit der Achse des Auges *A*.

5. Der obere schiefe Muskel *t* entspringt vom Rande des *Foramen opticum*, läuft an der inneren oberen Seite der Augenhöhle nach vorn, seine Sehne geht durch eine kleine Schleife *u* (*trochlea*), die am oberen vorderen Rande der Augenhöhle befestigt ist, biegt hier um und heftet sich an die obere Seite des Augapfels, bei *C*. Der Muskel übt einen Zug in Richtung seiner Sehne aus.

6. Der untere schiefe Muskel, in der Figur nicht sichtbar, entspringt vom inneren vorderen Umfange der Augenhöhle, läuft unter dem Augapfel nach der Schläfenseite herüber und befestigt sich am äußeren hinteren Umfange des Augapfels bei *v* Fig. 22. Die Drehungsachse *BB* für die schiefen Augenmuskeln

läuft ebenfalls horizontal von außen und vorn nach innen und hinten, und macht mit der Drehungsachse des oberen und unteren geraden Muskels einen Winkel von etwa 75°, mit der Achse des Auges einen von 35°.

Durch verschiedenartig kombinierte Wirkung dieser sechs Muskeln kann die Augenachse nach jeder beliebigen Richtung gewendet, und auch der Augapfel um die Augenachse gedreht werden. Wenn wir hier für je zwei Muskeln eines Paares eine gemeinschaftliche Drehungsachse angenommen haben, so scheint diese Annahme wenigstens vorläufig als erste Annäherung erlaubt zu sein, und vereinfacht die Übersicht der Bewegungen, welche die Augenmuskeln auszuführen haben, ungemein.

Nach vorn ist der Augapfel geschützt durch zwei Deckplatten, die Augenlider (*Palpebrae*). Jedes von ihnen schließt ein Knorpelplättchen ein, welches auf der äußeren Seite von der äußeren Haut überzogen ist, auf der inneren von einer Schleimhaut, die von dort auf den Augapfel übergeht, Bindehaut des Auges (*Conjunctiva*). Sie ist an die weiße Sehnenhaut des Augapfels locker angeheftet, nur am Rande der Hornhaut verschmilzt sie fest mit ihr. Die Oberfläche der Bindehaut und die vordere Fläche der Hornhaut werden von drei verschiedenen Sekreten fortdauernd befeuchtet. Diese sind 1) das Sekret der Meibomschen Drüsen, welche an der inneren Fläche der Augenlider unter der Bindehaut liegen. Ihre Ausführungsgänge öffnen sich längs der hinteren Kante der Augenlidränder. Dieses fettige Sekret haftet meistens wohl nur an den Rändern der Lider, und verhindert das Überfließen der wäßrigen Tränen; es kann sich aber auch in öligen Tropfen über die Hornhaut verbreiten, namentlich bei starken Bewegungen der Lider. 2) Der Schleim der Schleimdrüschen der Bindehaut, welche am zahlreichsten am Rande der Falten zwischen den Lidern und dem Augapfel sich vorfinden. 3) Die Tränenflüssigkeit, abgesondert von den Tränendrüsen, von denen je zwei auf jeder Seite im oberen äußeren Teile der Augenhöhle liegen. Sie ergießen ihr wäßriges Sekret, welches nur etwa 1 Proz. feste Substanzen enthält, durch 7 bis 10 feine Ausführungsgänge oberhalb des äußeren Augenwinkels zwischen das obere Lid und den Augapfel. Von hier verbreitet es sich über die ganze Fläche der Conjunctiva und wird am inneren Augenwinkel durch zwei feine Öffnungen, die Tränenpunkte, aufgenommen, die Mündungen der beiden Tränenkanälchen, welche es in einen weiteren Kanal, *Ductus nasolacrymalis*, und endlich in die Nase führen.

Die Bindehaut des Auges ist außerordentlich empfindlich. Jede leiseste Berührung eines fremden Körpers erregt Schmerz und eine unwillkürliche Bewegung der Augenlider, das Blinzeln. Dadurch und durch die fortdauernd über die Bindehaut hinsickernde Tränenfeuchtigkeit wird die vordere Fläche der Hornhaut stets rein und glänzend erhalten, was ein notwendiges Erfordernis für ein deutliches Sehen ist. Größere in der Luft schwebende Staubteilchen, Insekten usw. werden außerdem durch die Wimpern abgefangen.

Physiologische Optik.

---

§ 8. Einteilung des Gegenstandes.

Die physiologische Optik ist die Lehre von den Wahrnehmungen durch den Gesichtssinn. Wir sehen die Objekte der Außenwelt durch Vermittelung des Lichts, welches von ihnen her in unser Auge fällt. Dies Licht trifft die Netzhaut, einen empfindungsfähigen Teil unseres Nervensystems, und regt in ihr Empfindungen an. Die Empfindungen, durch den Sehnerven dem Gehirne zugeleitet, werden die Veranlassung, daß unser Bewußtsein die Vorstellung von gewissen im Raume verteilten Gegenständen faßt.

Demgemäß zerfällt die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen in drei Abschnitte:

1. Die Lehre von den Wegen des Lichts im Auge. Da wir darin hauptsächlich mit Brechungen der Lichtstrahlen und nur ausnahmsweise mit spiegelnder oder diffuser Reflexion zu tun haben, können wir diesen Teil auch die Dioptrik des Auges nennen.
2. Die Lehre von den Empfindungen des Sehnervenapparats, in welcher die Empfindungen behandelt werden, ohne Bezug zu nehmen auf die Möglichkeit, äußere Objekte durch sie zu erkennen.
3. Die Lehre von dem Verständnisse der Gesichtsempfindungen, welche von den Vorstellungen handelt, die wir auf Grund der Gesichtsempfindungen über die Objekte der Außenwelt uns bilden.

Die physiologische Optik unterscheidet sich also von der physikalischen Optik dadurch, daß erstere die Eigenschaften und Gesetze des Lichts nur insofern behandelt, als sie zu den Gesichtswahrnehmungen in Beziehung stehen, während die physikalische Optik die Eigenschaften und Gesetze des Lichts untersucht, welche ihm unabhängig vom menschlichen Auge zukommen. Wenn die letztere auf das Auge Rücksicht nimmt, so benutzt sie es nur als experimentelles Hilfsmittel, als das bequemste Reagens, um das Dasein und die Verbreitung des Lichts zu erkennen und Licht verschiedener Art zu unterscheiden.

Für diejenigen meiner Leser, welchen die Resultate der physikalischen Optik nicht vollständig geläufig sind, schalte ich hier einen kurzen Abriß der wesentlichen Eigentümlichkeiten des Lichts ein, welche für die physiologische Optik von Wichtigkeit sind, und gebe die Definitionen der physikalischen Begriffe, mit denen wir in der Folge zu tun haben werden.

Das Licht wird von der Mehrzahl der Physiker als eine eigentümliche Bewegungsform eines hypothetischen Mediums, des Lichtäthers, angesehen, und wir wollen uns dieser Ansicht, der Undulationstheorie, die sehr vollständig von allen Erscheinungen Rechenschaft gibt, anschließen.

Die Art der Bewegung der Ätherteilchen längs eines Lichtstrahls, welche die Undulationstheorie ihren Folgerungen zugrunde legt, versinnlicht man sich am leichtesten, wenn man einen nassen Faden oder eine feine Kette *AB*

Fig. 23, indem man sie am oberen Ende bei A mit der Hand faßt, senkrecht herabhängen läßt, und nun die Hand seitlich hin und her bewegt. Der Faden biegt sich dann zu einer Wellenlinie, wie sie durch die gestrichelte Linie der Figur angedeutet ist, welche Wellenlinie fortdauernd vom oberen zum unteren Ende herabläuft. Bei den Wellen, die sich längs des Fadens von oben nach unten fortpflanzen, bleibt jedes einzelne Teilchen des Fadens immer in gleicher Höhe über dem Boden, wobei es entweder in geraden Linien von rechts nach links, oder von vorn nach hinten hin und her schwanken, oder in horizontalen, kreisförmigen oder elliptischen Bahnen um seine mittlere Gleichgewichtslage sich bewegen kann, je nachdem sich die Hand, welche den Faden hält, von rechts nach links, oder von vorn nach hinten, oder in geschlossenen krummen Linien bewegt.

Fig. 23.

Ganz ähnlich der Bewegung der einzelnen Teile des Fadens würde die Bewegung einer Reihe von Ätherteilchen sein, längs welcher sich ein Lichtstrahl fortpflanzt. Jedes einzelne Teilchen des Äthers bleibt fortdauernd in der Nähe seiner ursprünglichen Ruhelage, und bewegt sich in geraden oder gekrümmten Bahnen um diese. Was sich als Licht fortbewegt, sind nicht die Ätherteilchen selbst, sondern nur die Wellenform, in welche sie sich während ihrer Bewegung ordnen, mit ihren verschiedenen Abwechslungen (*Phasen*) von Ausweichung und Geschwindigkeit.

Die Bahnen der Ätherteilchen bei der Lichtbewegung liegen in Ebenen, welche *senkrecht* gegen die Fortpflanzungsrichtung der Wellen sind, ganz wie bei unserem Faden, wo die Wellen in vertikaler Richtung nach dem Boden hin laufen, und jeder einzelne Teil des schwingenden Fadens stets in gleicher Höhe über dem Boden eine horizontale Bahn beschreibt. Dadurch unterscheiden sich die Lichtwellen von den Wellen elastischer Flüssigkeiten, z. B. von der Schallbewegung der Luft, bei welcher die Teilchen *parallel* der Fortpflanzungsrichtung oszillieren.

Wenn die Bahn der schwingenden Ätherteilchen in einem Lichtwellenzuge geradlinig ist, nennt man das Licht *geradlinig polarisiert*, wenn die Bahn kreisförmig oder elliptisch ist, nennt man das Licht dagegen *kreisförmig* oder *elliptisch polarisiert*, wobei die Drehung rechts oder links herum geschehen kann. Zwei geradlinig polarisierte Strahlen, deren Schwingungsrichtungen aufeinander senkrecht stehen, nennt man *senkrecht gegeneinander polarisiert*. Das natürliche Licht, wie es von leuchtenden Körpern ausgeht, verhält sich meist wie eine gleichmäßige Mischung von allen Arten verschieden polarisierten Lichts; man nennt solches *unpolarisiert*. Erst durch die Brechung und Spiegelung des Lichts erhält man Licht, in welchem eine Art der Polarisation überwiegt, oder allein vorkommt.

Wenn jedes Ätherteilchen bei der Lichtbewegung immer genau in derselben Zeit denselben Weg mit derselben Geschwindigkeit wiederholt durchläuft, nennt man das Licht *einfach*, *einfarbig* oder *homogen*, und die Zeit, in der es seinen Weg einmal zurücklegt, heißt die *Schwingungsdauer*. Die auffallendste Eigentümlichkeit, durch welche sich Licht verschiedener Schwingungsdauer voneinander unterscheidet, ist die Farbe. Das natürliche Licht der leuchtenden Körper ist meistens nicht einfaches Licht von konstanter Schwingungsdauer, sondern enthält Wellenzüge von einer unendlichen Menge kontinuierlich in-

einander übergehender Werte der Schwingungsdauer. Man nennt solches Licht gemischtes oder zusammengesetztes Licht. Das weiße Licht der Sonne ist gemischtes Licht. Einfaches Licht kann man am besten durch Brechung in durchsichtigen Prismen aus dem gemischten ausscheiden, indem nach der Brechung die Wellenzüge verschiedener Schwingungsdauer in verschiedenen Richtungen sich fortpflanzen. Wir können also die Bewegung in einem Strahle natürlichen Lichts vergleichen mit der Bewegung, welche unser Faden annehmen würde, wenn die Hand, welche ihn hält, unregelmäßige Bewegungen sowohl der Dauer als der Richtung nach ausführt, bei denen sie sich aber nie weit von ihrer mittleren Lage entfernt.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtwellen ist außerordentlich groß. Für den Weltenraum ist sie durch astronomische Beobachtungen bestimmt worden, und beträgt hier 310177,5 Kilometer (41179 preußische Meilen) in der Sekunde. In durchsichtigen Körpern ist sie geringer, und in diesen meistens, nicht ganz gleich für Licht verschiedener Schwingungsdauer.

In kristallisierten Körpern, oder solchen, deren molekulärer Bau nach verschiedenen Richtungen hin verschieden ist (doppeltbrechenden Körpern), ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit auch für verschiedene Richtungen der Fortpflanzung und der Polarisation verschieden.

Wenn längs der Linie AB Fig. 23 ein einfacher, geradlinig polarisierter Lichtstrahl sich fortpflanzt, so ordnen sich die Ätherteilchen, welche anfangs in der geraden Linie AB lagen, in eine Wellenlinie $a_0 b_0 a_1 b_1 a_2$, welche sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortschiebt, und wechselnde Ausbiegungen nach rechts und nach links von gleicher Länge zeigt. Die Länge von zwei solchen Ausbiegungen, $c_0 c_1$, oder überhaupt die Entfernung je zweier entsprechender Punkte auf zwei nächst aufeinander folgenden, nach gleicher Richtung hin gebogenen Teilen der Wellenlinie nennt man die Wellenlänge. Während nun der Gipfel des Wellenbergs von a_0 bis a_1 sich fortschiebt, muß bei A ein neuer Gipfel der Linie angekommen sein, und das Ätherteilchen bei A muß eine ganze Schwingungsdauer vollendet haben. Während der Zeit einer Schwingungsdauer pflanzt sich also das Licht um eine Wellenlänge fort, d. h. die Wellenlänge ist gleich der Schwingungsdauer, multipliziert mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Daraus folgt, daß bei Licht von gleicher Schwingungsdauer in durchsichtigen Mitteln verschiedener Art die Wellenlänge der Fortpflanzungsgeschwindigkeit proportional sein muß, und daß die Wellenlängen in dichteren durchsichtigen Medien im allgemeinen kleiner sind als im leeren Raume.

Die Wellenlängen kann man mit Hilfe der Phänomene der Interferenz messen und daraus die Schwingungsdauer des betreffenden Lichts berechnen. Die Phänomene der Interferenz beruhen darauf, daß zwei Lichtstrahlen sich gegenseitig verstärken, wenn sie gleichgerichtete Ätherbewegungen, sich aber aufheben, wenn sie entgegengesetzt gerichtete hervorbringen. Zwei Teile eines Lichtstrahls, welche nach verschiedenen Wegen sich wieder vereinigen, verstärken sich also, wenn ihre Wege gar nicht, oder um ein, zwei, mehrere ganze Wellenlängen unterschieden sind, und sie heben sich auf, wenn die Wege um eine ungerade Zahl halber Wellenlängen unterschieden sind. Aus solchen Phänomenen der Interferenz hat man nun gefunden, daß die Lichtwellenlängen im leeren Raume 14 bis 25 Millionteile eines Pariser Zolls (0,00039 bis 0,00069 Mm.) betragen, und daraus für die Zahl der Schwingungen in der Sekunde 451 bis 789 Billionen gefunden.

Die Erschütterungen, welche ein leuchtender Punkt in einem einfach brechenden Mittel dem umgebenden Äther mitteilt, pflanzen sich von ihm aus gleichmäßig und mit gleicher Geschwindigkeit nach allen Richtungen fort. Dadurch entsteht eine kugelförmige Ausbreitung der Welle, wobei die Exkursionen der schwingenden Ätherteilchen in dem Verhältnisse abnehmen, wie der Radius der Welle wächst. Die Intensität des Lichts aber, welche dem Quadrate der Exkursionen proportional zu setzen ist, verhält sich demnach in verschiedenen Entfernungen umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung vom leuchtenden Punkte. Bei einer solchen räumlichen Ausbreitung der Lichtbewegung nennt man eine Fläche, in der Ätherteilchen liegen, die alle in derselben Phase der Schwingung begriffen sind, eine Wellenfläche.

Ich habe noch den Begriff des Lichtstrahls zu erörtern. Seine mathematische Definition ist die, daß er eine auf den Wellenflächen senkrechte Linie sei; haben wir es also mit kugelig sich verbreitenden Wellen zu tun, so ist er ein Radius der konzentrischen Kugelflächen und behält seine Richtung so lange bei, als die Lichtbewegung in demselben durchsichtigen Medium ungestört fortschreitet. Wenn wir nun die Bewegung der längs eines Strahls gelegenen Ätherteilchen betrachten, so ist dieselbe streng genommen allerdings nicht unabhängig von der Bewegung der Teilchen in benachbarten Strahlen. Indessen haben Störungen in diesen benachbarten Bewegungen durch dunkle Körper usw. unter den gewöhnlich stattfindenden Bedingungen, mit denen wir es auch namentlich im Auge allein zu tun haben, keinen beträchtlichen Einfluß auf die Bewegungen der Teile des ersten Strahls. Wir können also in solchen Fällen die Bewegung der Ätherteilchen innerhalb eines Strahls annähernd als ein abgeschlossenes mechanisches Ganze ansehen, welches unabhängig von den Bewegungen der benachbarten Strahlen vonstatten geht. Dadurch wird die theoretische Untersuchung der Lichtbewegungen außerordentlich vereinfacht und erleichtert. So sind wir denn auch im täglichen Leben gewöhnt vorauszusetzen, daß jeder Lichtstrahl geradlinig fortschreite, ungehindert durch das, was seitlich von ihm geschieht, und in der Tat sind die Abweichungen von dieser Regel in den gewöhnlich vorkommenden Fällen ganz unmerklich. Diese Auflösung der kugelförmigen Ausbreitung der Lichtwellen in linear sich fortpflanzende Strahlen ist aber namentlich dann nicht mehr erlaubt, wenn das Licht durch so kleine Öffnungen hindurchgeht, daß die Wellenlängen des Lichts nicht mehr verschwindend klein gegen deren Dimensionen sind. Dann breiten sich sehr merkliche Quantitäten des Lichts seitlich aus. Überhaupt sind Ablenkungen kleiner Teile des Lichts von dem geraden Wege (Diffraktion) überall da zu bemerken, wo Licht an dem Rande undurchsichtiger Körper vorbeigeht. In solchen Fällen muß man auf die Bewegung der ganzen Lichtwellen zurückgehen, um die Phänomene zu erklären. Für die Physik des Auges können wir dagegen die Bewegung des Lichts unbedenklich als geradlinig betrachten, solange es in einem homogenen Medium sich fortpflanzt.

Licht und Schall unterscheiden sich in dieser Beziehung sehr auffallend, wenn auch eigentlich nur relativ, voneinander. Die Dimensionen der uns umgebenden Körper sind meist so groß, daß die Lichtwellenlängen dagegen als verschwindend klein zu betrachten sind; deshalb bewegt sich die bei weitem größte Menge des Lichts nur geradlinig fort, und es erfordert die Herstellung besonderer Apparate, um die seitliche Ausbreitung kleinerer Teile desselben wahrzunehmen. Die Schallwellen sind dagegen mehrere Zoll oder Fuß lang,

und zeigen deshalb, wenn sie zwischen festen Körpern hindurchgehen, meist eine sehr bedeutende Seitenausbreitung. Wir wissen deshalb aus den alltäglichen Wahrnehmungen, daß wir nur in gerader Linie sehen, aber um Ecken herum hören können. Eben deshalb dürfen wir aber auch die Schallbewegung nicht in Schallstrahlen auflösen wollen, wir würden uns dadurch zu weit von den wirklichen Verhältnissen entfernen, und dasselbe ist der Grund, daß die Theorie des Schalls bis jetzt noch so wenig ausgebildet werden konnte, im Vergleiche zu der des Lichts. Demselben Umstande verdankt unser Auge die Möglichkeit, aus der Richtung der einfallenden Lichtstrahlen sehr genau auf den Ort des leuchtenden Körpers schließen zu können, was beim Schall nur höchst unvollkommen möglich ist. Andererseits wird auch das Auge durch jeden in den Weg tretenden dunklen Körper verhindert zu sehen, was hinter ihm vorgeht, während das Ohr sehr wohl Töne vernehmen kann, die hinter ihm erregt werden. So hängen mit der seitlichen Ausbreitung der Wellenzüge eigentümliche Vorteile und Nachteile beider Sinne zusammen.

Wenn Licht auf die Grenzfläche zweier verschiedenartiger durchsichtiger Mittel fällt, wird in der Regel ein Teil zurückgeworfen (reflektiert) und bleibt in dem Mittel, in welchem er war, ein anderer Teil geht in das andere Medium über, wird dabei aber in der Regel von seiner bisherigen Richtung abgelenkt, d. h. gebrochen (refrangiert). Ist die Trennungsfläche glatt (poliert), sind beide Mittel einfach brechend, so wird ein auffallender Lichtstrahl nur nach einer Richtung hin zurückgeworfen (spiegelnde Reflexion), und nur nach einer Richtung hin gebrochen. Ist die Trennungsfläche rauh, so wird das Licht, auch wenn es nur aus einer Richtung herkommt, nach vielen oder allen Richtungen hin zurückgeworfen und gebrochen, es wird zerstreut (diffuse Reflexion und Refraktion).

Während das Licht in einem körperlichen Mittel sich fortbewegt, kann es entweder ungeschwächt bleiben, so weit es auch gehen mag; dann nennen wir das Mittel durchsichtig. Absolut durchsichtige Mittel gibt es vielleicht nicht außer dem leeren Raume. Oder es kann das Licht allmählich geschwächt werden, und zwar auf zweierlei Weise. Entweder nämlich wird es von kleinen fremden Körpern, Sprüngen, Stellen mit geändertem Gefüge usw. diffus zurückgeworfen und gebrochen (falsche innere Dispersion), dabei erscheint das Mittel trübe und in seinem Inneren selbst erleuchtet. Oder das Licht verschwindet, ohne von seinem Wege abgelenkt zu werden (Absorption). Da die Absorption meistenteils die Strahlen von verschiedener Schwingungsdauer verschieden schnell verschwinden macht, so wird weißes Licht, wenn es durch absorbierende Mittel geht, meistens farbig, und das Mittel selbst erscheint gefärbt. Farblose durchsichtige Mittel sind solche, welche alle leuchtenden Strahlen ungeschwächt durchgehen lassen. Dieselben können dabei aber nicht leuchtende Strahlen absorbieren, z. B. Wärmestrahlen oder die brechbarsten Strahlen des Sonnenlichts, sich gegen solche also noch wie gefärbte Mittel gegen die leuchtenden Strahlen verhalten.

Bei der Absorption der Lichtstrahlen entstehen oft chemische Wirkungen; zuweilen wieder Licht, und wahrscheinlich immer Wärme. Wenn wieder Licht entsteht, so sendet jeder Teil des beleuchteten Mittels Licht nach allen Seiten aus, welches sich aber in der Farbe und Zusammensetzung von dem absorbierten Lichte unterscheidet, die Substanz wird selbstleuchtend. Man nennt dieses Selbstleuchten Phosphoreszenz, wenn es länger dauert als die Bestrahlung,

Fluoreszenz oder **wahre innere Dispersion**, wenn es nur so lange dauert als die Bestrahlung. Bei der Fluoreszenz ist das von der Substanz entwickelte Licht in der Regel von größerer Schwingungsdauer als das einstrahlende, seine Farbe und Zusammensetzung meist unabhängig von der des letzteren, es findet also eine Veränderung der Schwingungsdauer (Brechbarkeit) statt, und es wird dadurch möglich, das dem Auge nicht sichtbare oder kaum sichtbare Licht, dessen Schwingungsdauer kleiner ist als die des gewöhnlich sichtbaren, dem Auge sichtbar zu machen, indem man es auf eine fluoreszierende Substanz (saures schwefelsaures Chinin, Uranglas, Aufguß von Roßkastanienrinde, Bernstein usw.) fallen läßt.

Ich lasse hier eine Aufzählung von Werken folgen, welche die physiologische Optik im allgemeinen betreffen:

1600. Fabricius ab Aquapendente, *de visione*. Ven. Fol.
1604. J. Kepler, Paralipomena ad Vitellionem. Frankf. Cap. 5.
1613. Francisci Aquilonii, opticorum libri sex. Antwerpiae.
1619. Scheiner, Oculus sive fundamentum opticum, in quo radius visualis eruitur. sive visionis in oculo sedes cernitur et anguli visorii ingenium reperitur. Oenip.
1738. R. Smith, *a complete system of optics with* J. Jurins, *essay upon distinct and indistinct vision*. Cambridge 1738. — Deutsch v. Kästner. Altenb. 1755.
1740. Le Cat, *Traité des sens*. Rouen.
1746. P. Camper, dissert. de visu. Lugd. Batav.
1759. Porterfield, *Treatise on the eyes, the manner and phaenomena of vision*. Edinb.
1766. Haller, Elementa physiologiae hum. Lausanne 1757. Bern 1766.
1819. J. Purkinje, Beiträge zur Kenntnis des Sehens in subjektiver Hinsicht. Prag.
1825. J. Purkinje, Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Bd. II. Neue Beiträge zur Kenntnis des Sehens. Berlin.
Lehot, *Nouvelle théorie de la vision*. Paris.
1826. J. Müller, Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig.
1828. Muncke, Artikel: Gesicht und Sehen in Gehlers physikalischem Wörterbuche. Leipzig.
1830. A. Hueck, Das Sehen seinem äußeren Prozesse nach. Dorpat u. Göttingen.
1831. D. Brewster, *A treatise on optics*.
1834. C. M. N. Bartels, Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes. Berlin.
1836. A. W. Volckmann, Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns.
1837. J. Müllers Lehrbuch der Physiologie des Menschen. Coblenz. Bd. II. S. 276—393.
1839. F. W. G. Radicke, Handbuch der Optik. Bd. II. S. 211 - 281.
1842. Burow, Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. Berlin.
1844. Moser über das Auge in Doves Repertorium der Physik. Berlin. Bd. V.
1845. Th. Ruete, Lehrbuch der Ophthalmologie.
1846. Volckmann, Artikel: Sehen in R. Wagners Handwörterbuch d. Physiologie. Braunschweig.
1852. C. Ludwig, Lehrbuch der Physiologie des Menschen. Heidelberg. Bd. I. S. 192 bis 263.
1847-53. Brücke, Berichte über physiologische Optik in Fortschritte der Physik. Bd. I bis V.

Erster Abschnitt.

Die Dioptrik des Auges.

§ 9. Gesetze der Brechung in Systemen kugeliger Flächen.[1]

Der Gang der Lichtstrahlen im menschlichen Auge wird hauptsächlich durch Brechung verändert. Es ist aber nicht bloß eine einzelne brechende Fläche vorhanden, sondern eine Reihe von solchen. Ich werde also die allgemeinen Gesetze der Lichtbrechung in einfach brechenden Mitteln und namentlich auch der Brechung in einer Reihe von gekrümmten Flächen, welche die Grundlage des vorliegenden Abschnitts bilden, vorausschicken.

An einer einzelnen brechenden Fläche ist die Lage des zurückgeworfenen und gebrochenen Strahls in folgender Weise bestimmt. In Fig. 24 sei *a b* die Grenzfläche beider Medien, welche man die brechende Fläche nennt; *fc* sei einer der darauf fallenden Lichtstrahlen, *de* die im Punkte *c* auf *a b* senkrecht stehende Linie, welche man das Einfallslot nennt, *ch* der zurückgeworfene und *cg* der gebrochene Strahl. Die Ebene, welche durch das Einfallslot und den einfallenden Strahl zu legen ist, nennt man Einfallsebene, den Winkel zwischen dem einfallenden Strahle und dem Einfallslote den Einfallswinkel (in der Figur ist es der Winkel *dcf*; mit α bezeichnet), den Winkel zwischen dem Einfallslote und dem zurückgeworfenen Strahle den Reflexionswinkel in der Figur *hcd*) und denjenigen zwischen dem Einfallslote und dem gebrochenen Strahle (*gce* oder β) den Brechungswinkel. Bei einfach brechenden Medien ist dann die Lage des zurückgeworfenen und gebrochenen Strahls dadurch gegeben, daß erstens beide ebenfalls in der Einfallsebene liegen, und daß zweitens der Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel ist, der Brechungswinkel aber von dem Einfallswinkel in der Weise abhängt, daß ihre Sinus sich verhalten wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichts in den betreffenden beiden Medien. Das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts im Vakuum zu der in einem gegebenen Mittel nennt man das Brechungsverhältnis oder Brechungsvermögen dieses Mittels. Ist also c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Vakuum, c_1 in dem ersten, c_2 in dem zweiten Mittel, n_1 das Brechungsverhältnis des ersten, n_2 das des zweiten Mittels, so ist

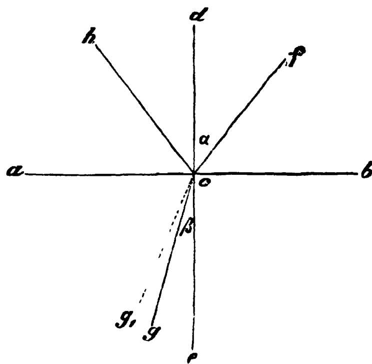


Fig. 24.

[1] Vgl. Kap. 1 der nach dem ersten Abschnitte folgenden Zusätze! G.

$$n_1 = \frac{c}{c_1}$$

$$n_2 = \frac{c}{c_2}$$

$$\frac{\sin\alpha}{c_1} = \frac{\sin\beta}{c_2} \quad \text{oder}$$

$$n_1 \sin\alpha = n_2 \sin\beta .$$

In der letzteren Form pflegt man gewöhnlich das Brechungsgesetz auszusprechen. Für das Vakuum ist das Brechungsverhältnis nach der gegebenen Definition = 1, für die Luft bei gewöhnlichem Drucke so wenig davon unterschieden (nämlich 1,00029 bei 0° und 0,76 mm Druck), daß man in den meisten Fällen den Unterschied vernachlässigen kann. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der verschiedenen einfachen farbigen Strahlen sind im Vakuum nicht voneinander verschieden, wohl aber in den durchsichtigen tropfbaren und festen Körpern. In diesen pflanzen sich in der Regel die Strahlen von kleinerer Schwingungsdauer (die blauen und violetten) langsamer fort als die von längerer Schwingungsdauer (gelbe und rote), es sind also auch die Brechungsverhältnisse für die ersteren größer als für die zweiten, und man bezeichnet deshalb auch jene (die violetten) als die brechbareren Strahlen, letztere (die roten) als die weniger brechbaren. Wegen dieser Verschiedenheit der Brechbarkeit schlagen denn auch die verschiedenen farbigen Teile des weißen Lichts nach einer Brechung in tropfbaren oder festen Körpern im allgemeinen verschiedene Wege ein, und es gibt dies ein Mittel ab, sie zu trennen. In der Fig. 24 ist vorausgesetzt, daß oberhalb der brechenden Fläche sich ein dünneres, unterhalb derselben ein dichteres Medium befinde. Kommt das Licht aus dem ersteren von f her, so wird der gebrochene Strahl cg dem Einfallslote ce genähert werden. Für die violetten Strahlen ist die Ablenkung stärker als für die roten. Wenn also die violetten etwa den Weg cg einschlagen, geht das rote Licht des Strahls fc in der Richtung cg_1 fort, und trennt sich somit von den brechbareren Farben.

Im Auge haben wir es mit der Brechung des Lichts an kugeligen oder nahehin kugeligen Flächen zu tun. Die Gesetze der Brechung vereinfachen sich für eine jede solche Fläche außerordentlich, wenn das Licht nur unter sehr kleinen Einfallswinkeln, d. h. nahe senkrecht auf sie fällt. Sie vereinfachen sich auch für ein System solcher Flächen, wenn die Mittelpunkte der Kugelflächen alle in einer geraden Linie, der Achse des Systems, liegen. Systeme von kugeligen Flächen, in denen diese letzte Bedingung erfüllt ist, nennt man zentriert. Licht, welches ursprünglich von einem Punkte ausgegangen ist, oder allgemeiner, Licht, dessen Strahlen hinreichend verlängert alle durch einen Punkt gehen, d. h. homozentrisches Licht, wird, nachdem es durch ein solches System gegangen ist, und alle brechenden Flächen nur unter kleinen Einfallswinkeln getroffen hat, entweder sich in einen Punkt wieder vereinigen, oder so fortgehen, als käme es alles von einem leuchtenden Punkte her, also wieder homozentrisch sein. Den Konvergenzpunkt der Lichtstrahlen nennt man in beiden Fällen das optische Bild des ursprünglich leuchtenden Punktes, oder da Lichtstrahlen, welche von dem Orte des Bildes ausgehen würden, an der Stelle des ursprünglich leuchtenden Punktes wieder vereinigt werden würden, nennt man den Ort des leuchtenden Punktes und den seines Bildes auch kon-

jugierte Vereinigungspunkte der Strahlen. Man nennt ferner das optische Bild reell, wenn die Lichtstrahlen, welche von dem leuchtenden Punkte ausgegangen sind, in ihm wirklich zur Vereinigung kommen. Dies kann nur geschehen, wenn das Bild hinter den brechenden Flächen liegt. Man nennt es virtuell, wenn der Vereinigungspunkt der Lichtstrahlen in ihren rückwärts gezogenen Verlängerungen vor der letzten brechenden Fläche liegt. Im letzteren Falle schneiden sich also nicht die Lichtstrahlen selbst, sondern nur ihre Verlängerungen.

Konvexe Glaslinsen (Brenngläser oder Sammellinsen) geben von entfernten Gegenständen reelle Bilder, wie Fig. 25 zeigt; *cd* ist die Linse, *a* der leuchtende Punkt, die einfallenden Lichtstrahlen *ac* und *ad* werden in die Richtungen *cf* und *de* gebrochen, vereinigen sich wirklich in dem Punkte *b*, dem Punkte des reellen Bildes, und gehen nach der Schneidung wieder divergierend auseinander, gerade als wäre *b* ein ursprünglich leuchtender Punkt.

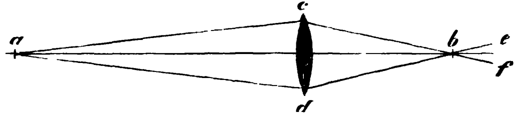


Fig. 25.

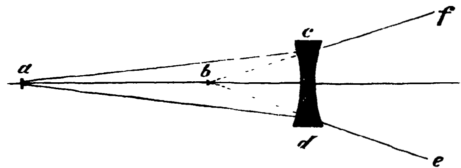


Fig. 26.

Konkave Glaslinsen (Zerstreuungsgläser) geben virtuelle Bilder wie in Fig. 26, wo die Bezeichnungen dieselben sind wie in Fig. 25. Hier schneiden sich die Lichtstrahlen nicht wirklich, wohl aber ihre Verlängerungen in *b*, und gehen hinter der Linse weiter, als kämen sie von *b*, so daß ein hinter der Linse zwischen *f* und *e* stehendes Auge glauben würde, den leuchtenden Punkt in *b* zu sehen.

Wenn mehrere leuchtende Punkte in einer gegen die Achse des brechenden Systems senkrechten Fläche liegen, und der Achse nahe genug sind, daß ihre Strahlen auf sämtliche brechende Kugelflächen unter sehr kleinen Einfallswinkeln treffen, so liegen ihre reellen oder virtuellen Bilder auch alle in einer auf die optische Achse senkrechten Ebene, und ihre Verteilung in dieser Ebene ist geometrisch ähnlich der Verteilung der leuchtenden Punkte, und gehören die leuchtenden Punkte einem Objekte an, so ist das optische Bild dieses Objekts ihm selbst ähnlich.

Ein Beispiel reeller Bilder von Objekten, welches zugleich den Verhältnissen des Auges höchst ähnlich ist, gibt unter den physikalischen Instrumenten die *Camera obscura*. Ein innen geschwärzter Kasten *A* enthält in seiner vorderen Wand eine verschiebbare Röhre, in welche eine oder mehrere Glaslinsen *l* eingesetzt sind. Die Rückseite des Kastens *g* besteht aus einer matten Glastafel. Wenn man die Gläser *l* gegen entfernte erleuchtete Objekte wendet, und die matte Tafel *g* beschattet, so sieht man auf ihr ein umgekehrtes, natürlich gefärbtes Bild der Objekte entworfen, welches auch bei einer richtigen Stellung der Linsen *l* sehr scharf gezeichnet erscheint. Die Linsen müssen zu dem Ende so gewählt und gestellt sein, daß die Strahlen, welche von einem jeden einzelnen Punkte des ab-

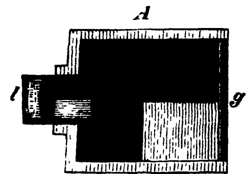


Fig. 27.

gebildeten Gegenstandes ausgegangen sind, sich in einem Punkte der mattgeschliffenen Glasfläche wieder vereinigen. Dann empfängt dieser Punkt der Glasfläche alles Licht, welches von dem entsprechenden Punkte des abgebildeten Gegenstandes her in das Instrument gefallen ist, und wird von ihm in derselben Farbe und entsprechender Helligkeit erleuchtet, wie sie dem Punkte des Objekts zukommen. Dagegen fällt auf diese Stelle der Glastafel kein Licht, welches von irgend einem anderen Punkte des Gegenstandes ausgegangen wäre, weil solches Licht eben in anderen Punkten der Tafel sich vereinigt.

Bei diesen Beobachtungen bemerkt man zunächst, daß die Bilder ungleich von dem Instrumente entfernter Gegenstände nicht gleichzeitig deutlich auf der matten Tafel entworfen werden, daß man vielmehr die Röhre mit den Linsen etwas herausziehen muß, um nähere Gegenstände abzubilden, für entferntere dagegen mehr hineinschieben. Der Grund davon ist der, daß die Bilder ungleich entfernter Punkte auch selbst verschiedene Entfernung von den Linsen haben, also nicht gleichzeitig genau in der Ebene der matten Glastafel liegen können.

Man bemerkt ferner, wenn die Linsen einen großen Durchmesser im Verhältnis zur Länge des Kastens haben, daß die Ränder heller Flächen in dem Bilde farbige, meist blaue oder gelbrote Säume zeigen. Wegen der verschiedenen Brechbarkeit des verschiedenfarbigen Lichts liegen die Vereinigungspunkte verschiedenfarbiger Strahlen nicht genau in derselben Entfernung hinter der Linse, und die Bilder für die verschiedenen Farben decken sich nicht genau. Man nennt dies die chromatische Abweichung. Sie kann fast vollständig aufgehoben werden durch eine passende Verbindung von Linsen, die aus verschiedenem Stoffe bestehen. Dergleichen optische Instrumente, in welchen so die chromatische Abweichung beseitigt ist, nennt man achromatisch.

Aber auch bei der Beleuchtung mit einfarbigem Lichte zeigen die Bilder der *Camera obscura* und anderer optischer Instrumente mit brechenden Kugelflächen bei großen Öffnungen der Linsen eine gewisse Ungenauigkeit der Umrisse, welche daher entsteht, daß die durch eine kugelige Fläche gebrochenen Strahlen des abgebildeten Punktes zwar nahehin, aber doch nicht absolut genau in einen Punkt wieder vereinigt werden. Nur bei verschwindend kleinen Einfallswinkeln werden sie genau vereinigt. Diese zweite Art der Abweichung nennt man die sphärische oder die Abweichung wegen der Kugelgestalt. Instrumente, in denen sie durch passende Zusammenstellung der brechenden Flächen möglichst verringert ist, nennt man aplanatisch. Vollständige Aplanasie ist durch Kugelflächen im allgemeinen nicht zu erreichen, sondern dazu würde man andere gekrümmte Flächen und zwar Rotationsflächen des zweiten oder vierten Grades anwenden müssen, welche aber an optischen Instrumenten bisher noch nicht ausgeführt werden können.

Die Lage und Größe der optischen Bilder, welche zentrierte Systeme von kugeligen brechenden Flächen entwerfen, sowie auch der Gang eines jeden durch sie hindurchgegangenen Lichtstrahls, der sämtliche brechende Flächen unter sehr kleinen Einfallswinkeln passiert hat, ist nach verhältnismäßig einfachen Regeln zu bestimmen, wenn man gewisse Punkte, die optischen Kardinalpunkte des Systems kennt. Es gibt drei Paare von solchen Punkten, nämlich die beiden Brennpunkte, die beiden Hauptpunkte und die beiden Knotenpunkte.

Man nenne die Seite des Systems, von der das Licht herkommt, die **erste**, die, nach der es hingeht, die **zweite Seite**, das Brechungsverhältnis des ersten Mittels sei n_1, das des letzten n_2.

Der **erste Brennpunkt** ist dadurch bestimmt, daß jeder Strahl, der vor der Brechung durch ihn geht, nach der Brechung parallel mit der Achse wird.

Der **zweite Brennpunkt** ist dadurch bestimmt, daß durch ihn jeder Strahl geht, der vor der Brechung parallel der Achse ist.

Der **zweite Hauptpunkt** ist das Bild des **ersten**, d. h. Strahlen, welche im ersten Mittel durch den ersten Hauptpunkt gehen, gehen nach der letzten Brechung durch den zweiten. Ebenen, senkrecht zur Achse durch die Hauptpunkte gelegt, heißen **Hauptebenen**. Die zweite Hauptebene ist das optische Bild der ersten, und zwar sind es die einzigen zusammengehörigen Bilder, welche gleich groß und gleich gerichtet sind. Durch diese Bedingung ist die Lage der Hauptpunkte bestimmt.

Der zweite **Knotenpunkt** ist das Bild des **ersten**. Ein Strahl, der im ersten Medium nach dem ersten Knotenpunkte gerichtet ist, geht nach der Brechung durch den zweiten Knotenpunkt, und die Richtungen des Strahls vor und nach der Brechung sind einander parallel.

Die Entfernung des ersten Hauptpunkts vom ersten Brennpunkte ist die erste **Hauptbrennweite**. Sie wird positiv gerechnet, wenn der erste Hauptpunkt im Sinne der Fortbewegung des Lichts hinter dem ersten Brennpunkte liegt. Ist also in Fig. 28 AB die Achse, und A die Richtung, wo das Licht herkommt, $f_{,}$ der erste, $f_{,,}$ der zweite Brennpunkt, $h_{,}$ der erste, $h_{,,}$ der zweite Hauptpunkt, $k_{,}$ der erste, $k_{,,}$ der zweite Knotenpunkt, so ist $f_{,}h_{,}$ die positive erste Hauptbrennweite. Dagegen $f_{,,}h_{,,}$, als die Entfernung des zweiten Brennpunkts vom zweiten Hauptpunkte, ist die zweite Hauptbrennweite, positiv gerechnet, wenn, wie in der Figur, der Brennpunkt hinter dem Hauptpunkte liegt.

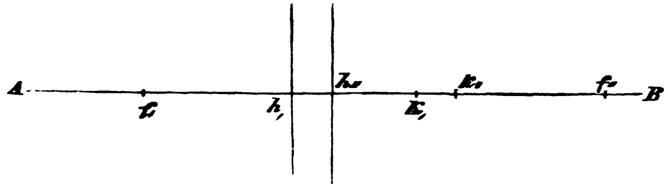


Fig. 28.

Die Entfernung des ersten Knotenpunkts vom ersten Brennpunkte ist gleich der zweiten Hauptbrennweite, die des zweiten Knotenpunkts vom zweiten Brennpunkte gleich der ersten Hauptbrennweite. Also:

$$\left.\begin{array}{l} f_{,}k_{,} = f_{,,}h_{,,} \\ f_{,}h_{,} = f_{,,}k_{,,} \end{array}\right\} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ \alpha).$$

Daraus folgt, daß der Abstand der gleichnamigen Haupt- und Knotenpunkte voneinander gleich dem Unterschiede der beiden Brennweiten sei:

$$k_{,}h_{,} = k_{,,}h_{,,} = f_{,,}h_{,,} - f_{,}h_{,} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ \beta)$$

und daß außerdem der Abstand der beiden Hauptpunkte voneinander gleich sei dem Abstande der beiden Knotenpunkte voneinander:

$$h_{,}h_{,,} = k_{,}k_{,,} \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ \gamma).$$

Endlich verhalten sich die beiden Hauptbrennweiten zueinander wie die Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mittels:

$$\frac{f_{,} h_{,}}{n_{,}} = \frac{f_{,,} h_{,,}}{n_{,,}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad \delta).$$

Ist also das letzte Mittel dem ersten gleichartig und $n_{,} = n_{,,}$, wie es bei den meisten optischen Instrumenten, nicht aber beim Auge der Fall ist, so sind die beiden Hauptbrennweiten gleich, und es fallen die gleichnamigen Hauptpunkte und Knotenpunkte zusammen, nach Gleichung β).

Die ersten Brenn-, Haupt- und Knotenpunkte beziehen sich nach den gegebenen Definitionen stets auf den Gang der Strahlen im ersten Medium, die zweiten auf den Gang im letzten Medium.

Legt man senkrecht zur Achse Ebenen durch die beiden Brennpunkte, so heißen diese Brennebenen. Lichtstrahlen, welche von einem Punkte der ersten Brennebene ausgegangen sind, sind nach der Brechung untereinander parallel, und da nach der Definition der Knotenpunkte der vom leuchtenden Punkte nach dem ersten Knotenpunkte gerichtete Strahl nach der Brechung seiner ursprünglichen Richtung parallel sein soll, so müssen alle Strahlen, die von einem leuchtenden Punkte in der ersten Brennebene ausgegangen sind, jenem Strahle nach der Brechung parallel sein.

Strahlen, welche im ersten Mittel untereinander parallel sind, vereinigen sich in einem Punkte der zweiten Brennebene, und da derjenige von den parallelen Strahlen, welcher durch den ersten Knotenpunkt geht, nach der Brechung vom zweiten Knotenpunkte aus seiner früheren Richtung parallel weiter geht, so muß der Vereinigungspunkt der parallelen Strahlen da liegen, wo dieser letztere Strahl die zweite Brennebene schneidet.

Diese Regeln genügen, um in jedem Falle, wenn der Weg eines Strahls im ersten Medium gegeben ist, seinen Weg nach der letzten Brechung zu finden, und wenn ein leuchtender Punkt im ersten Medium gegeben ist, den Ort seines Bildes nach der letzten Brechung zu finden.

Fig. 29.

Es sei *ab* der Weg eines Strahls im ersten Medium; man soll seinen Weg im letzten Medium finden.

Es sei *a* der Punkt, wo er die erste Brennebene schneidet, *b* der Punkt, wo er die erste Hauptebene schneidet, wobei im allgemeinen die beiden Punkte *a* und *b* nicht in einer Ebene mit der Achse des Systems *AB* liegen werden. Das Bild des Punktes *b* liegt in der zweiten Hauptebene, da die eine Hauptebene das Bild der anderen ist; und da ferner in diesem Falle das eine Bild dem anderen gleich und gleich gerichtet sein soll, so liegt das Bild des Punktes *b* der ersten Hauptebene in *c*, dem Fußpunkte des von *b* auf die zweite

Hauptebene gefällten Lotes *bc*. Jeder Lichtstrahl, der von *b* ausgeht, oder durch *b* hindurchgeht, muß also nach der Brechung durch *c* gehen, als dem Bilde von *b*. So auch die Fortsetzung des Strahls *ab*.

Zweitens geht der Strahl *ab* durch den Punkt *a* der ersten Brennebene. Jeder Strahl, welcher von einem Punkte der ersten Brennebene ausgeht, ist nach den oben hingestellten Regeln nach der Brechung parallel dem Strahle, welcher von jenem Punkte *a* nach dem ersten Knotenpunkte geht. Also muß der Strahl *ab* nach der Brechung durch *c* gehen und parallel $a k_{\prime}$ sein. Man ziehe *cd* parallel $a k_{\prime}$, so ist *cd* der gebrochene Strahl.

Nach dem, was ich vorher über die Eigenschaft der zweiten Brennebene gesagt habe, können wir auch so verfahren. Man fälle das Lot *bc* auf die zweite Hauptebene, ziehe $k_{\prime\prime} e$ parallel *ab*, welches in *e* die zweite Brennebene schneidet, so ist *ce* der gebrochene Strahl. Daß dieser mit *cd* zusammenfällt, läßt sich leicht zeigen.

Es sei *a* ein leuchtender Punkt; es soll sein Bild gefunden werden.

Man braucht nur zwei Strahlen von *a* aus nach der ersten Hauptebene zu ziehen, und deren Weg nach der Brechung zu konstruieren. Wo sie sich schneiden, liegt das Bild von *a*. Wenn *a* außerhalb der Achse liegt, ist es am bequemsten, den mit der Achse parallelen Strahl *ac* und den nach dem ersten Knotenpunkte gehenden $a k_{\prime}$ zu benutzen. Wenn *c* der Punkt ist, wo der erstere Strahl die zweite Hauptebene schneidet, so ziehe man $c f_{\prime\prime}$ und verlängere es rückwärts oder vorwärts hinreichend, bis es die durch $k_{\prime\prime}$ mit $a k_{\prime}$ gelegte Parallele in *e* schneidet. Der Ort des Bildes ist *e*.

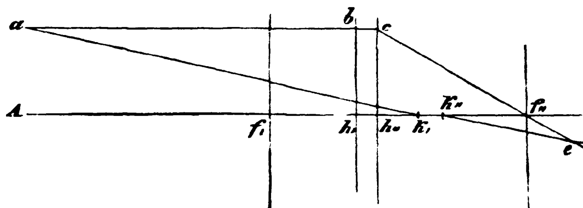


Fig. 30.

Daß der Strahl *ac* nach der Brechung längs *ce* und $a k_{\prime}$ längs $k_{\prime\prime} e$ geht, ergibt sich leicht aus der vorigen Aufgabe und den obigen Definitionen.

Liegt der Punkt *a* in der Achse, so geht einer seiner Strahlen in der Achse selbst ungebrochen fort. Man braucht dann nur irgend einen anderen Strahl zu konstruieren, der außerhalb der Achse verläuft. Wo letzterer nach der Brechung die Achse wieder schneidet, ist der Ort des Bildes.

Nachdem ich so die Resultate der mathematischen Untersuchung für diejenigen meiner Leser vorausgeschickt habe, denen es nur auf die Kenntnis der Resultate ankommt, lasse ich die vollständige mathematische Entwickelung derselben hier folgen.

Brechung an einer Kugelfläche.

Es sei *a* der Mittelpunkt der Kugelfläche *cb*, und *p* ein außerhalb der Kugel liegender leuchtender Punkt. Ein von *p* ausgehender Lichtstrahl, welcher in der geraden Linie *pa* auf den Mittelpunkt der Kugel zugeht, trifft die Kugelfläche normal, und geht deshalb ungebrochen weiter in der Verlängerung von *ap* nach *q* hin. Ein anderer Lichtstrahl *pc* treffe die Kugelfläche in *c* und werde hier gebrochen. Unsere nächste Aufgabe ist, seinen Weg nach der

Brechung zu bestimmen. Nach dem oben angeführten Brechungsgesetze muß derselbe zunächst in der Einfallsebene bleiben, d. h. in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallslot gelegten Ebene. Da der Radius stets auf demjenigen Teile der Kugeloberfläche, zu welchem er hingeht, senkrecht steht, so ist in diesem Falle das Einfallslot $c\,d$ die Verlängerung des Radius $a\,c$, und die Einfallsebene die durch $p\,c$ und $a\,d$ gelegte. In derselben liegt auch die ganze Linie $p\,q$, da zwei ihrer Punkte p und a darin liegen. Der gebrochene Strahl muß also die Linie $p\,a$, wenn sie nach beiden Seiten in das Unendliche verlängert gedacht wird, in irgend einem Punkte q schneiden, dessen Entfernung von b zunächst bestimmt werden soll. Sollte der Strahl der Linie $p\,a$ parallel sein, so können wir den Durchschnittspunkt q als unendlich entfernt betrachten.

Fig. 31.

Die Lage des Punktes q wird nun durch die Bedingung gegeben, daß

$$n_{,} \sin(p\,c\,d) = n_{,,} \sin(q\,c\,a) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1),$$

wo $n_{,}$ das Brechungsverhältnis des Mediums ist, aus welchem das Licht kommt, $n_{,,}$ desjenigen, in welches es eintritt.

Da sich in geradlinigen Dreiecken die Sinus der Winkel wie die gegenüberliegenden Seiten verhalten, ist in dem Dreiecke $a\,p\,c$

$$\frac{\sin(p\,c\,a)}{\sin(c\,p\,a)} = \frac{a\,p}{a\,c}$$

und in dem Dreiecke $a\,q\,c$

$$\frac{\sin(q\,c\,a)}{\sin(c\,q\,a)} = \frac{a\,q}{a\,c}.$$

Wenn wir die erste dieser Gleichungen durch die zweite dividieren, und dabei bemerken, daß der Sinus des Winkels $p\,c\,a$ gleich dem seines Nebenwinkels $p\,c\,d$ ist, so erhalten wir

$$\frac{\sin(p\,c\,d)}{\sin(q\,c\,a)} \cdot \frac{\sin(c\,q\,a)}{\sin(c\,p\,a)} = \frac{a\,p}{a\,q}.$$

Nach Gleichung (1) ist

$$\frac{\sin(p\,c\,d)}{\sin(q\,c\,a)} = \frac{n_{,,}}{n_{,}}$$

und in dem Dreieck $p\,c\,q$ ist

$$\frac{\sin(c\,q\,a)}{\sin(c\,p\,a)} = \frac{c\,p}{c\,q}.$$

Die drei letzten Gleichungen geben daher

$$\frac{n_{,,}\cdot c\,p}{n_{,}\cdot c\,q} = \frac{a\,p}{a\,q} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Für $a\,p = \infty$ wird daraus

$$n_{,}\cdot c\,q = n_{,,}\cdot a\,q \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2a),$$

da alsdann bis auf unendlich kleine Größen

$$\frac{c\,p}{a\,p} = 1.$$

Man kann die Gleichung 2) leicht benutzen, um den Gang der Lichtstrahlen durch Konstruktion zu finden, wobei man denn, da im allgemeinen der Punkt q seine Lage ändert, wenn dem Punkte c eine andere Lage gegeben wird, findet, daß die Lichtstrahlen sich nicht genau in einem Punkte, sondern in einer krummen Linie (kaustischen Linie) schneiden, von der Art, wie sie in Fig. 32 für parallel auffallende Strahlen dargestellt ist. BB ist hier die brechende Kugelfläche, C sind die einfallenden Strahlen, GFG die kaustische Linie, welche durch die Durchschnittspunkte je zweier zunächst aufeinander folgender gebrochener Strahlen gebildet wird. Die mittelsten Strahlen vereinigen sich in der Spitze dieser Linie bei F.

Fig. 32.

Wenn wir uns auf diejenigen Strahlen beschränken, welche nahe *senkrecht* auf die brechende Fläche, also sehr nahe der Achse auf sie fallen, so sehen wir aus der Fig. 31, daß, wenn der Punkt c sehr nahe an b rückt, das Verhältnis $\frac{cp}{cq}$ übergeht in $\frac{bp}{bq}$. Die Gleichung 2) wird dann also

$$\frac{n_{,,} \cdot bp}{n_{,} \cdot bq} = \frac{ap}{aq} \qquad \text{2b)}$$

Bezeichnen wir den Radius ab der brechenden Fläche mit r, die Entfernung

bp mit $f_{,}$,
bq mit $f_{,,}$,
ap mit $g_{,}$,
aq mit $g_{,,}$,

so daß also

$$\left.\begin{array}{l} f_{,} + r = g_{,} \\ f_{,,} \quad = g_{,,} + r, \end{array}\right\} \qquad \text{2c)}$$

so wird die Gleichung 2b)

$$\frac{n_{,,} f_{,}}{n_{,} f_{,,}} = \frac{f_{,} + r}{f_{,,} - r} \quad \text{oder}$$

$$\frac{n_{,,}(g_{,} - r)}{n_{,}(g_{,,} + r)} = \frac{g_{,}}{g_{,,}}.$$

Daraus erhält man durch eine leichte Umformung:

$$\left.\begin{array}{l} \frac{n_{,}}{f_{,}} + \frac{n_{,,}}{f_{,,}} = \frac{n_{,,} - n_{,}}{r} \quad \text{oder} \\ \frac{n_{,,}}{g_{,}} + \frac{n_{,}}{g_{,,}} = \frac{n_{,,} - n_{,}}{r}, \end{array}\right\} \qquad \text{3)}$$

aus denen die gesuchte Größe $f_{,,}$ oder $g_{,,}$ zu bestimmen ist.

Nennen wir die Werte von $f_{,,}$ und $g_{,,}$, welche einer unendlichen Entfernung des leuchtenden Punkts entsprechen, beziehlich $F_{,,}$ und $G_{,,}$, so erhalten wir, da $f_{,} = \infty$ und $g_{,} = \infty$

$$\left.\begin{aligned} F_{\prime\prime} &= \frac{n_{\prime\prime} r}{n_{\prime\prime} - n_{\prime}} \\ G_{\prime\prime} &= \frac{n_{\prime} r}{n_{\prime\prime} - n_{\prime}}. \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3\text{a})$$

Setzen wir $f_{\prime\prime}$ und $g_{\prime\prime}$ unendlich groß, und bezeichnen für diesen Fall $f_{\prime}$ und $g_{\prime}$ mit $F_{\prime}$ und $G_{\prime}$, so ist

$$\left.\begin{aligned} F_{\prime} &= \frac{n_{\prime} r}{n_{\prime\prime} - n_{\prime}} = G_{\prime\prime} \\ G_{\prime} &= \frac{n_{\prime\prime} r}{n_{\prime\prime} - n_{\prime}} = F_{\prime\prime} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3\text{b})$$

und nun können wir den Gleichungen 3) die einfache Form geben

$$\left.\begin{aligned} \frac{F_{\prime}}{f_{\prime}} + \frac{F_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime}} &= 1 \\ \frac{G_{\prime}}{g_{\prime}} + \frac{G_{\prime\prime}}{g_{\prime\prime}} &= 1. \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3\text{c})$$

Die erste dieser Gleichungen gibt, nach $f_{\prime}$ und nach $f_{\prime\prime}$ aufgelöst, folgende Formeln zur Berechnung dieser Größen

$$\left.\begin{aligned} f_{\prime} &= \frac{F_{\prime} f_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime} - F_{\prime\prime}} \\ f_{\prime\prime} &= \frac{F_{\prime\prime} f_{\prime}}{f_{\prime} - F_{\prime}}. \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3\text{d})$$

Findet man negative Werte dieser Größen, so bedeutet es, daß sie auf der entgegengesetzten Seite der brechenden Fläche liegen, als in Fig. 31 angenommen ist.

Bemerkungen. 1. Wenn das Licht nicht von p im ersten Medium, sondern von q im zweiten ausgeht, wird für den Strahl cq Fig. 31, der vorher der gebrochene Strahl, jetzt der einfallende ist, cp der zugehörige gebrochene sein, welcher vorher der einfallende war. Sind also die nahe senkrecht von p auf die brechende Fläche fallenden Strahlen in q vereinigt, so werden die von q nahe senkrecht auffallenden in p vereinigt werden. Daraus ergeben sich nun sogleich die Formeln für den Fall, daß die Lichtstrahlen auf die konkave Seite der Kugelfläche fallen. Man braucht nur das erste Medium jetzt das zweite zu nennen und umgekehrt, und dementsprechend alle Indizes der Buchstaben zu vertauschen. Die Grundgleichungen 3) werden alsdann

$$\frac{n_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime}} + \frac{n_{\prime}}{f_{\prime}} = \frac{n_{\prime} - n_{\prime\prime}}{r}$$

$$\frac{n_{\prime}}{g_{\prime\prime}} + \frac{n_{\prime\prime}}{g_{\prime}} = \frac{n_{\prime} - n_{\prime\prime}}{r}.$$

Man braucht also für eine konkave brechende Fläche nur den Krümmungsradius r negativ zu setzen, so gilt auch für sie die Formel 3), und natürlich gelten ebenso auch die daraus abgeleiteten 3a), 3b), 3c) und 3d).

2. Wenn q das Bild von p ist, ist auch p das Bild von q. Um diese gemeinsame Beziehung auszudrücken, nennt man sie konjugierte Vereinigungs-

punkte, wobei man es zweifelhaft läßt, von welchem beider Punkte das Licht ausgeht. Ebenso ist es für die Brechungsgesetze einerlei, ob der Licht aussendende Punkt ein materieller, Licht erzeugender oder auffallendes Licht zerstreuender Punkt sei, oder nur der Vereinigungspunkt von gebrochenen Strahlen. Daher kann der leuchtende Punkt auch ein virtueller Vereinigungspunkt solcher Strahlen sein, und in der Verlängerung der Strahlen hinter der brechenden Fläche liegen.

3. Ich bemerke noch, daß auch die Gesetze der Reflexion der Strahlen an gekrümmten Spiegeln aus den gegebenen Formeln 3) hervorgehen, wenn man $n_{\prime\prime} = -n_{\prime}$ setzt. Wir werden dergleichen Formeln für die Spiegelbilder, welche die brechenden Flächen im Auge geben, zuweilen brauchen. Gewöhnlich zieht man es jedoch vor, für solche Spiegel die Bezeichnung anders zu wählen. Setzen wir in der ersten Gleichung 3) statt $n_{\prime\prime}$ überall $-n_{\prime}$, so erhalten wir

$$\frac{1}{f_{\prime}} - \frac{1}{f_{\prime\prime}} = -\frac{2}{r}.$$

Ist r nach unserer bisherigen Bezeichnung positiv, d. h. der Spiegel konvex, so würde für $f_{\prime} = \infty$ der Wert von $f_{\prime\prime}$ werden gleich $\frac{r}{2}$, also positiv, d. h. der Vereinigungspunkt der Strahlen liegt hinter der spiegelnden Fläche, ist nur virtuell. Wäre der Spiegel konkav, r also negativ, so wird auch $f_{\prime\prime}$ negativ, das Bild des leuchtenden Punktes liegt vor dem Spiegel und ist reell. Gewöhnlich zieht man vor, die Entfernungen der reellen Bilder vom Spiegel positiv zu nennen. Man gibt also dem $f_{\prime\prime}$ und dem Radius der spiegelnden Fläche r entgegengesetzte Vorzeichen als bei brechenden Flächen, und schreibt demnach die Grundgleichung

$$\frac{1}{f_{\prime}} + \frac{1}{f_{\prime\prime}} = \frac{2}{r}.$$

4. Wenn r unendlich groß, d. h. die brechende Fläche eben wird, so werden nach 3a) auch die Brennweiten unendlich groß, und die erste der Gleichungen 3) verwandelt sich in

$$\frac{n_{\prime}}{f_{\prime}} + \frac{n_{\prime\prime}}{f_{\prime\prime}} = 0$$

oder

$$f_{\prime\prime} = -\frac{n_{\prime\prime}}{n_{\prime}} f_{\prime} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3e)$$

Das Bild liegt also auf derselben Seite von der brechenden Fläche, aber in einer anderen Entfernung.

Abbildung von Objekten durch eine brechende Kugelfläche.

Wenn im folgenden die Rede von Objekten ist, deren Bilder durch gekrümmte brechende Flächen entworfen werden, so sind darunter stets ebene Objekte verstanden, deren Fläche senkrecht steht gegen die Achse des optischen Systems, und von denen nur solche Lichtstrahlen ausgehen, die erstens nahe senkrecht auf die brechenden Flächen fallen, und zweitens mit der Achse sehr kleine Winkel einschließen.

Wenn eine kugelige brechende Fläche von einem leuchtenden Punkte ein Bild entwirft, so können wir die Verbindungslinie dieses Punktes mit dem

Mittelpunkte als Achse betrachten. Wenn ein Objekt von der beschriebenen Art da ist, müssen wir das von dem Mittelpunkte auf die Ebene des Objekts gefällte Lot als die Achse betrachten.

Es sei in Fig. 33 pr die Achse, sp senkrecht zu pr ein Durchschnitt der Ebene des Objekts, s ein leuchtender, seitlich neben der Achse liegender Punkt, a der Mittelpunkt der brechenden Fläche, t das Bild von s. Es soll die Lage von t bestimmt werden durch zwei rechtwinkelige Koordinaten ra und rt, jenes parallel, dieses senkrecht zur Achse.

Fig. 33.

Abstrahieren wir zunächst von p, r und den übrigen vorhandenen leuchtenden Punkten des Objekts sp, so muß das Bild von s, wie aus der bisherigen Untersuchung hervorgeht, zunächst in der Verlängerung der Verbindungslinie von s und a liegen, so daß also sa und at eine gerade Linie bilden.

Bezeichnen wir sa mit $\gamma_{,}$ und at mit $\gamma_{,,}$, so ist nach Gleichung 3c)

$$\frac{G_{,}}{\gamma_{,}} + \frac{G_{,,}}{\gamma_{,,}} = 1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4).$$

Bezeichnen wir ferner pa mit $g_{,}$, ar mit x und den Winkel sap mit α, so ist

$$\gamma_{,} = \frac{g_{,}}{\cos\alpha}$$

$$\gamma_{,,} = \frac{x}{\cos\alpha}.$$

Die Werte von $\gamma_{,}$ und $\gamma_{,,}$ in die Gleichung 4) gesetzt ergeben:

$$\frac{G_{,}}{g_{,}} + \frac{G_{,,}}{x} = \frac{1}{\cos\alpha}.$$

Da nach der vorangeschickten Voraussetzung über die Größe der abzubildenden Objekte der Winkel α sehr klein sein soll, so unterscheidet sich $\cos\alpha$ von 1 nur um ein Kleines zweiter Ordnung, und kann daher annähernd $= 1$ gesetzt werden. Dann erhalten wir

$$\frac{G_{,}}{g_{,}} + \frac{G_{,,}}{x} = 1.$$

Ist $g_{,,}$ die Entfernung des Bildes von p von a, so ist

$$\frac{G_{,}}{g_{,}} + \frac{G_{,,}}{g_{,,}} = 1,$$

also

$$x = g_{,,} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 5).$$

Der Fußpunkt des Lotes tr ist also das Bild von p.

Die Bilder der Punkte, welche in einer durch p gegen die Achse senkrecht gelegten Ebene liegen, liegen also auch annähernd in einer gegen die Achse senkrechten Ebene, welche durch das Bild von p gelegt ist.

Hat man also zuerst das Bild r von p gesucht, und durch r eine gegen die Achse senkrechte Ebene gelegt, so findet man die Orte der Bilder aller einzelnen Punkte des leuchtenden Objekts leicht, indem man durch den betreffenden Punkt des Objekts und den Mittelpunkt der brechenden Kugelfläche

eine gerade Linie legt; wo diese die durch r gelegte Ebene schneidet, ist der Ort des Bildes.

Aus dieser Konstruktion folgt nach bekannten geometrischen Sätzen, daß das Bild dem Objekte geometrisch ähnlich ist.

Daraus ergibt sich ferner leicht das Verhältnis der entsprechenden Lineardimensionen des Objekts zu denen des Bildes. Nennen wir z. B. sp als eine solche Dimension des Objekts $\beta_{,}$, und tr als die zugehörige des Bildes $-\beta_{,,}$ (negativ, weil sie an der entgegengesetzten Seite der Achse liegt), so ist:

$$-\frac{\beta_{,}}{\beta_{,,}} = \frac{g_{,}}{g_{,,}} \quad \text{. . . . . 6)}$$

oder in Verbindung mit 2c), 3a), 3b) und 3c)

$$\frac{\beta_{,,}}{\beta_{,}} = \frac{G_{,,}}{G_{,} - g_{,}} = \frac{G_{,,} - g_{,,}}{G_{,}} \quad \text{. . . . . 6a)}$$

oder

$$\frac{\beta_{,,}}{\beta_{,}} = \frac{F_{,}}{F_{,} - f_{,}} = \frac{F_{,,} - f_{,,}}{F_{,,}} \quad \text{. . . . . 6b).}$$

Wenn die brechende Fläche eben ist, werden die Brennweiten unendlich groß, und die Gleichung 6b) verwandelt sich in

$$\frac{\beta_{,,}}{\beta_{,}} = 1 \quad \text{. . . . . 6c).}$$

Das Bild, welches eine ebene brechende Fläche entwirft, ist also so groß wie sein Objekt.

Verallgemeinerung der bisher gewonnenen Formeln. Wir wollen zunächst die oben definierten Begriffe der Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte auf unseren Fall anwenden.

Die Brennpunkte sind diejenigen Punkte, in denen sich Strahlen vereinigen, die im ersten oder zweiten Mittel parallel der Achse verlaufen. Die Entfernungen der beiden Brennpunkte $F_{,}$ und $F_{,,}$ von dem Scheitel der brechenden Fläche, und $G_{,}$ und $G_{,,}$ von deren Mittelpunkten sind schon oben in den Gleichungen 3a) und 3b) gefunden, und dadurch ist die Lage der Brennpunkte bestimmt.

Die Brennebenen sind senkrecht durch die Brennpunkte gelegte Ebenen. Da das Bild jedes Brennpunktes in unendlicher Entfernung liegt, so muß dasselbe auch für solche Punkte der Brennebenen der Fall sein, welche der Achse nahe genug sind, um regelmäßige Bilder geben zu können. Strahlen, die von einem Punkte einer Brennebene ausgehen, werden also nach der Brechung parallel sein.

Die Hauptpunkte und die durch sie senkrecht zur Achse gelegten Hauptebenen sind dadurch charakterisiert, daß Bilder in den Hauptebenen liegend gleich gerichtet und gleich groß seien. Für die Hauptebenen muß also $\beta_{,} = \beta_{,,}$ sein. Das kann nach den Gleichungen 6b) nur der Fall sein, wenn $f_{,} = 0$ und $f_{,,} = 0$, was laut der Gleichungen 3d) stets gleichzeitig der Fall sein muß. Beide Hauptpunkte fallen also in unserem Falle zusammen in den Punkt, wo die Achse die brechende Fläche schneidet, und dieser Hauptpunkt ist sein eigenes Bild.

Die **Knotenpunkte** sind dadurch definiert, daß jeder Strahl, der vor der Brechung durch den ersten geht, nach der Brechung durch den zweiten geht, und dabei seiner ersten Richtung parallel bleibt. Auch diese beiden fallen in einen Punkt, nämlich den Mittelpunkt der Kugel zusammen. Denn ein Strahl, der im ersten Mittel auf den Mittelpunkt der Kugel zugeht, geht ungebrochen durch die Fläche, geht also auch im zweiten Mittel durch den Mittelpunkt, und ist seiner früheren Richtung parallel.

Die Konstruktionen der Richtung der Strahlen, welche oben aus den Definitionen der genannten Ebenen und Punkte hergeleitet sind, lassen sich also auch auf eine einzelne brechende Fläche anwenden, und die Konstruktionen vereinfachen sich noch dadurch, daß erstens jeder Punkt in der ersten Hauptebene sein eigenes Bild ist, und man nicht erst den zugehörigen in der zweiten Hauptebene zu suchen hat, und zweitens dadurch, daß der nach dem ersten Knotenpunkte gehende Strahl unmittelbar in seiner eigenen Verlängerung weiter geht, und man nicht erst eine Parallele mit ihm durch den zweiten Knotenpunkt zu legen hat.

Wir haben unter 3c) zwei Gleichungen ganz ähnlicher Form aufgestellt, bei denen aber die Entfernungen der Bilder von verschiedenen Punkten aus gemessen waren. Gleichungen von derselben einfachen Form erhalten wir immer, wenn wir die Entfernungen der Vereinigungspunkte, welche dem ersten Mittel angehören, von einem beliebigen Punkte s Fig. 34 der Zentrallinie ap an messen, und von dem Bilde t dieses Punktes aus die Entfernungen der Vereinigungspunkte, die dem zweiten Mittel angehören.

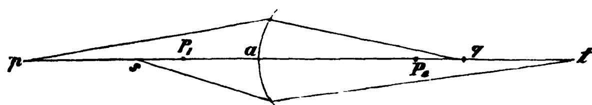


Fig. 34.

Ist also t das Bild von s, q das Bild von p, P_1 der erste, P_2 der zweite Hauptbrennpunkt, und bezeichnen wir

sa mit f_1,	$P_1 a$ mit F_1,
ta mit f_2,	$P_2 a$ mit F_2.
pa mit φ_1,	
qa mit φ_2,	
ps mit h_1,	qt mit $-h_2$.
$P_1 s$ mit $-H_1$,	tP_2 mit $-H_2$.

so ist

$$\alpha)\quad \frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} = 1$$

$$\beta)\quad \frac{F_1}{\varphi_1} + \frac{F_2}{\varphi_2} = 1$$

$$\gamma)\quad \varphi_1 - f_1 = h_1,$$

$$\delta)\quad \varphi_2 - f_2 = h_2.$$

$$\varepsilon)\quad F_1 - f_1 = H_1,$$

$$\zeta)\quad F_2 - f_2 = H_2.$$

Setzt man aus γ und δ die Werte von φ_1 und φ_2 in β, so erhält man

$$\frac{F_1}{h_1 + f_1} + \frac{F_2}{h_2 + f_2} = 1 \quad \text{oder}$$

$$F_1 (h_2 + f_2) + F_2 (h_1 + f_1) = (h_1 + f_1)(h_2 + f_2).$$

Subtrahiert man hiervon die aus α abzuleitende Gleichung

$$F_1 f_2 + F_2 f_1 = f_1 f_2,$$

so erhält man als Rest

$$F_1 h_2 + F_2 h_1 = h_1 h_2 + h_1 f_2 + h_2 f_1 \quad \text{oder}$$

$$(F_1 - f_1) h_2 + (F_2 - f_2) h_1 = h_1 h_2,$$

was vermöge der Gleichungen ε und ζ sich verwandelt in

$$H_1 h_2 + H_2 h_1 = h_1 h_2 \quad \text{oder}$$

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_2} = 1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 7).$$

Wenn man also als Ausgangspunkte für die Messung der Abstände irgend ein Paar zusammengehöriger Vereinigungspunkte von Lichtstrahlen benutzt, kommt man immer wieder zu derselben einfachen Formel zurück. Da in der brechenden Fläche selbst und in ihrem Mittelpunkte der leuchtende Punkt mit seinem Gegenstande zusammenfällt, sind diese beiden Punkte ihre eigenen Bilder, und die Formeln 3c) bilden deshalb nur spezielle Fälle von 7).

Wenn man den Punkt s in den ersten Brennpunkt verlegt, wird die Gleichung 7) unbrauchbar, weil H_2 und h_2 unendlich groß werden. Man findet aber die entsprechende Gleichung leicht aus der ersten der Gleichungen 3 d)

$$f_{,} = \frac{F_{,} f_{,,}}{f_{,,} - F_{,,}}.$$

Zieht man von beiden Seiten $F_{,}$ ab, so erhält man

$$f_{,} - F_{,} = \frac{F_{,} F_{,,}}{f_{,,} - F_{,,}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 7\,a).$$

Setzen wir hier $f_{,} - F_{,} = l_{,}$, und $f_{,,} - F_{,,} = l_{,,}$, wobei $l_{,}$ die Entfernung des leuchtenden Punktes vom ersten Brennpunkte aus nach vorn gerechnet, $l_{,,}$ die Entfernung seines Bildes vom zweiten Brennpunkte aus nach hinten sein würde, so erhalten wir die einfachste Form, in der sich das Gesetz für die Lage der Bilder darstellen läßt:

$$l_{,} l_{,,} = F_{,} F_{,,} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 7\,b).$$

In derselben Bezeichnungsweise wird das Gesetz für die Größe der Bilder, die Gleichung 6 b)

$$\left.\begin{aligned} \frac{\beta_{,}}{\beta_{,,}} &= -\frac{l_{,}}{F_{,}} \quad \text{oder} \\ \frac{\beta_{,,}}{\beta_{,}} &= -\frac{l_{,,}}{F_{,,}}. \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7\,c)$$

Beziehung zwischen der Größe der Bilder und Konvergenz der Strahlen.

Es sei in Fig. 35 pq die Achse, sp ein Objekt und qr sein Bild. Wir wollen die Winkel α_1 und α_2 bestimmen, welche einer der von p ausgehenden Strahlen pc vor und nach der Brechung mit der Achse macht, und diese Winkel positiv rechnen, wenn der Strahl sich in Richtung der als positiv gerechneten Bilder von der Achse entfernt. Es ist also $\angle cpa = \alpha_1$, $\angle cqa = -\alpha_2$. Es sei ferner, wie bisher, $sp = \beta_1$, $qr = -\beta_2$, $ap = f_1$, $aq = f_2$. Da die Einfallswinkel der Strahlen an der brechenden Fläche immer sehr klein bleiben sollen, muß ca ein sehr kleiner Bogen sein, den wir annähernd als eine gegen die Achse senkrechte gerade Linie betrachten können. Wir können also setzen

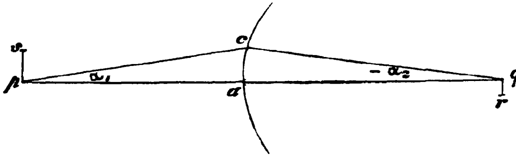


Fig. 35.

$$ac = f_1 \, tg \, \alpha_1,$$
$$ac = -f_2 \, tg \, \alpha_2, \quad \text{also}$$
$$f_1 \, tg \, \alpha_1 = -f_2 \, tg \, \alpha_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad A).$$

Wir haben ferner nach 3d) und 6b)

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{F_2}{f_1 - F_1} = \frac{f_2 - F_2}{F_1},$$
$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{F_1}{F_1 - f_1} = \frac{F_2 - f_2}{F_2}$$

und $\frac{F_2}{F_1} = \frac{n_2}{n_1}$ nach 3a) und 3b). Daraus folgt:

$$\frac{f_2}{f_1} = -\frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_1}.$$

Dies in die Gleichung A) gesetzt, gibt

$$n_1 \beta_1 \, tg \, \alpha_1 = n_2 \beta_2 \, tg \, \alpha_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7d).$$

Diese Gleichung spricht ein wichtiges Gesetz aus, welches die Größe der Bilder mit der Divergenz der Strahlen verknüpft, unabhängig von der Entfernung und der Brennweite der brechenden Fläche.

Brechung in Systemen von Kugelflächen.

Wir wollen jetzt die Gesetze der Brechung in zentrierten optischen Systemen untersuchen, d. h. solchen, welche eine Reihe von brechenden Kugelflächen enthalten, deren Mittelpunkte alle in einer geraden Linie, der optischen Achse des Systems, liegen.

Vorn nennen wir in bezug auf das System die Seite, von der das Licht herkommt, hinten die, wo es hingeht. Die brechende Fläche, welche das Licht zuerst trifft, ist die erste, das Medium, welches vor der ersten brechenden Fläche gelegen ist, das erste, das zwischen der ersten und zweiten gelegene

das zweite, das hinter der letzten, das letzte. Wenn wir m brechende Flächen haben, so haben wir $m + 1$ brechende Medien. Es sei n_1 das Brechungsverhältnis des ersten, n_2 des zweiten, n_{m+1} des letzten brechenden Mittels. Wie bisher nehmen wir die Radien der brechenden Flächen positiv, wenn deren Konvexität nach vorn, negativ, wenn sie nach hinten sieht. Auch bemerke ich hier gleich ein für allemal, daß, wenn von einem Strahlenzentrum oder Bilde gesprochen wird, welches in einem gewissen brechenden Mittel liege, oder diesem angehöre, darunter auch stets der Fall mitverstanden ist, wo das Bild potentiell ist, und erst durch Verlängerung der Strahlen über die Grenzen des Mittels hinaus entstehen würde.

Zunächst wissen wir aus der bisherigen Untersuchung, daß homozentrische Strahlen, welche unter kleinen Einfallswinkeln auf kugelige brechende Flächen fallen, homozentrisch bleiben. Daraus folgt, daß homozentrische Strahlen, welche unter kleinen Winkeln gegen die Achse in das optische System eintreten, nach jeder Brechung homozentrisch bleiben, und ebenso aus der letzten brechenden Fläche wieder heraustreten. Wenn das einfallende Licht einer Anzahl von Vereinigungspunkten angehört, welche alle in einer auf der optischen Achse senkrechten Ebene liegen, so wissen wir ferner, daß nach der ersten Brechung die Vereinigungspunkte wieder alle in einer auf der optischen Achse senkrechten Ebene liegen, und ihre Verteilung der früheren geometrisch ähnlich ist. So wird es daher auch nach jeder folgenden Brechung sein, und auch das letzte Bild wird dem ursprünglichen geometrisch ähnlich sein, und wie dieses in einer auf die optische Achse senkrechten Ebene liegen.

Indem man nun das Bild, welches von der ersten brechenden Fläche entworfen ist, als den Gegenstand für die zweite betrachtet, das Bild der zweiten als den Gegenstand der dritten usw., kann man ohne besondere Schwierigkeit schließlich Größe und Lage des letzten Bildes berechnen. Allerdings werden aber die Formeln schon bei einer mäßigen Zahl brechender Flächen bald sehr weitläufig.

Hier kommt es uns nur darauf an, einige allgemeine Gesetze zu beweisen, welche für jede beliebige Zahl brechender Flächen gültig sind, was uns für das Auge desto wichtiger ist, da dieses in den verschiedenen Schichten der Kristalllinse unendlich viele brechende Flächen enthält, die Rechnung auf dem angedeuteten Wege also doch nicht zu Ende zu führen sein würde.

1. Zuerst will ich zeigen, daß das in Gleichung 7) für eine Fläche ausgesprochene Gesetz auch für beliebig viele gilt.

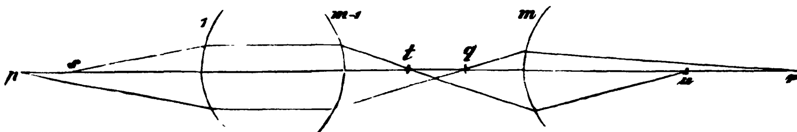


Fig. 36.

Es sei in Fig. 36 die mit 1 bezeichnete brechende Fläche die erste, die mit $(m - 1)$ bezeichnete die vorletzte, die mit m bezeichnete die letzte Fläche des Systems. Wenn s der Vereinigungspunkt der eintretenden Strahlen ist, sei u der der austretenden, wenn p der der eintretenden ist, sei r der der austretenden. Wir bezeichnen ps mit h_1, ur mit h_{m+1}, so will ich beweisen, daß

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_{m+1}} = 1,$$

wo H_1 der Abstand des ersten Hauptbrennpunktes von s, H_2 der des zweiten von u ist.

Um das Gesetz allgemein zu beweisen, werde ich zeigen, daß, wenn es für ein System von $(m-1)$ Flächen richtig ist, es auch für m Flächen gilt. Da es nun für eine Fläche bewiesen ist, folgt dann, daß es auch für zwei, und wenn für zwei, auch für drei usw. *in infinitum* richtig sei.

Das System der $(m-1)$ ersten Flächen entwerfe von dem Punkte s das Bild t, und von dem Punkte p das Bild q, und tq werde bezeichnet mit h_m. Die Entfernungen der Hauptbrennpunkte des Systems der $(m-1)$ Flächen von den Punkten s und t seien beziehlich L_1 und L_2, die Entfernungen der Hauptbrennpunkte der letzten $m$ten Fläche von den Punkten t und u seien beziehlich M_1 und M_2, wobei alle diese Entfernungen immer von den Punkten s, t und u aus in der Richtung positiv gerechnet werden, in welcher das brechende Medium, dem die betreffenden Strahlenbündel angehören, von den betreffenden brechenden Flächen oder Systemen liegt. Nun haben wir nach der Voraussetzung

$$\frac{L_1}{h_1} + \frac{L_2}{h_m} = 1.$$

und für die Brechung in der letzten Fläche

$$-\frac{M_1}{h_m} + \frac{M_2}{h_{m+1}} = 1.$$

Wenn wir die erste dieser Gleichungen mit L_2, die zweite mit M_1 dividieren und beide addieren, erhalten wir

$$\frac{L_1}{L_2}\cdot\frac{1}{h_1} + \frac{M_2}{M_1}\frac{1}{h_{m+1}} = \frac{1}{L_2} + \frac{1}{M_1} \quad \text{oder}$$

$$\frac{M_1 L_1}{M_1 + L_2}\cdot\frac{1}{h_1} + \frac{M_2 L_2}{M_1 + L_2}\cdot\frac{1}{h_{m+1}} = 1.$$

Setzen wir $h_1 = \infty$, wobei $h_{m+1} = H_2$ werden muß, so ergibt diese Gleichung

$$H_2 = \frac{M_2 L_2}{M_1 + L_2},$$

und setzen wir $h_{m+1} = \infty$, wobei $h_1 = H_1$ werden muß, so ergibt sich

$$H_1 = \frac{M_1 L_1}{M_1 + L_2},$$

also schließlich

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_{m+1}} = 1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 8),$$

wie zu beweisen war.

Diese Gleichung liefert für jeden reellen Wert zwischen $+\infty$ und $-\infty$ von h_1 einen und nur einen von h_{m+1}, und ebenso für jeden der letzteren Größe einen und nur einen von h_1. Der erste wie der letzte Vereinigungspunkt können also an jeder Stelle der Achse liegen, und sobald der eine gegeben ist, ist auch die Lage des anderen eindeutig bestimmt.

2. Jedes optische System hat zwei und nur zwei zusammengehörige Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen, in denen die Größe eines auf die Achse senkrechten ebenen Bildes der des zugehörigen Gegenstandes gleich wird. Wir nennen die Ebene eines solchen Gegenstandes die erste und die des zugehörigen Bildes die zweite Hauptebene des Systems, und die beiden Punkte, wo sie die optische Achse schneiden, beziehlich den ersten und zweiten Hauptpunkt. Die zu den Hauptpunkten gehörigen Hauptbrennweiten sind den zugehörigen Brechungsverhältnissen des ersten und letzten Mittels proportional.

Es sei sp der abgebildete Gegenstand, p ein Punkt desselben in der Achse, s ein anderer seitlich davon. Wenn wir den Gegenstand längs der Achse verschieben, so daß er immer sich selbst parallel bleibt, so wird sich der Punkt s in der mit der Achse parallelen Linie st bewegen. Der Lichtstrahl st wird

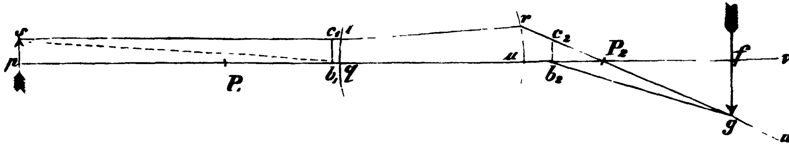


Fig. 37.

also stets dem Punkte s angehören, welches auch die Entfernung pq sein möge. Die der Achse parallelen Lichtstrahlen werden nun durch das brechende System so gebrochen, daß sie schließlich durch den zweiten Hauptbrennpunkt P_2 gehen. Es sei rw der Gang des Lichtstrahls st nach der letzten Brechung. Da st stets dem leuchtenden Punkte s angehört, muß rw stets dem Bilde dieses Punktes angehören, d. h. das Bild von s muß in rw liegen. Es sei fg das Bild von sp, welches nach dem Vorausgeschickten senkrecht gegen die Achse uv sein muß. Wenn p sich längs der Achse verschiebt, wird sich auch f längs uv, und g längs rw verschieben, und es ist ersichtlich, daß die Größe des Bildes fg sich hierbei proportional dem Abstande $P_2 f$ ändern muß, wie dasselbe für eine einfache brechende Fläche oben in den Gleichungen 6a) und 6b) ausgesprochen ist. Da ferner aus Gleichung 8) zu ersehen ist, daß die Entfernung $P_2 f$ jeden beliebigen Wert zwischen $+\infty$ und $-\infty$ annehmen kann, so wird auch die Größe des Bildes, wenn wir die eines umgekehrten Bildes negativ bezeichnen, jeden zwischen diesen Grenzen liegenden Wert annehmen können, und einen jeden nur einmal annehmen können. Es wird also auch seinem Gegenstande sp an einer und nur an einer Stelle gleich werden müssen; es sei $c_1 b_1$ in diesem Falle der Gegenstand und $c_2 b_2$ das ihm gleiche Bild, so bezeichnen diese beiden Linien die Lage der sogenannten Hauptebenen des Systems.

Bezeichnen wir nun

$$sp = c_2 b_2 = \beta_1,$$
$$fg = -\beta_2,$$
$$b_1 P_1 = F_1, \qquad b_1 p = f_1,$$
$$b_2 P_2 = F_2, \qquad b_2 f = f_2,$$

so ist

$$\frac{c_2 b_2}{fg} = \frac{b_2 P_2}{P_2 f} \quad \text{oder}$$

$$-\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{F_2}{f_2 - F_2},$$

und da nach Gleichung 8)

$$\frac{F_1}{f_1} + \frac{F_2}{f_2} = 1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8a),$$

so erhält man entsprechend der für eine brechende Fläche geltenden Gleichung 6b)

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{F_2}{F_2 - f_2} = \frac{F_1 - f_1}{F_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8b),$$

Nennen wir die Entfernung der zusammengehörigen Bilder von den Brennpunkten l_1 und l_2, so daß also

$$l_1 = f_1 - F_1,$$
$$l_2 = f_2 - F_2,$$

so erhalten wir aus der Gleichung 8a) in derselben Weise die einfachste Form für das Gesetz der Lage der Bilder eines zusammengesetzten Systems, wie wir für die einer einzelnen Fläche aus Gleichung 3d) die 7b) erhalten haben, nämlich

$$l_1 l_2 = F_1 F_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8c),$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{\beta_1}{\beta_2} &= -\frac{l_1}{F_1} \\ \frac{\beta_2}{\beta_1} &= -\frac{l_2}{F_2} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8d).$$

Um endlich das Verhältnis der Größen F_1 und F_2 zu finden, wenden wir das in der Gleichung 7d) ausgesprochene Gesetz auf den Strahl an, welcher vor der Brechung durch s und b_1, nach der Brechung also durch b_2 und g geht.

Nennen wir die Größe eines in der ersten Hauptebene enthaltenen Bildes $\gamma_,$, die Reihe der Bilder, welche bei den einzelnen Brechungen in dem Systeme gebildet werden, $\gamma_{,,}$, $\gamma_{,,,}$ usw. und γ_{m+1} das in der zweiten Hauptebene nach der letzten Brechung entworfene. Nach der Definition der Hauptebenen ist $\gamma_, = \gamma_{m+1}$. Nennen wir ferner $\alpha_,$ den Winkel zwischen dem Strahl $s b_1$ und der Achse im ersten Mittel, $\alpha_{,,}$, $\alpha_{,,,}$ usw. in den folgenden Mitteln, α_{m+1} im letzten Mittel, so daß

$$\angle\, s b_1 p = -\alpha_,,$$
$$\angle\, g b_2 f = -\alpha_{m+1}.$$

Nach der Gleichung 7d) ist

$$n_, \gamma_, \operatorname{tg} \alpha_, = n_{,,} \gamma_{,,} \operatorname{tg} \alpha_{,,},$$
$$n_{,,} \gamma_{,,} \operatorname{tg} \alpha_{,,} = n_{,,,} \gamma_{,,,} \operatorname{tg} \alpha_{,,,}$$

usw., woraus folgt

$$n_, \gamma_, \operatorname{tg} \alpha_, = n_{m+1} \gamma_{m+1} \operatorname{tg} \alpha_{m+1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9),$$

oder da $\gamma_, = \gamma_{m+1}$, so ist

$$n_, \operatorname{tg} \alpha_, = n_{m+1} \operatorname{tg} \alpha_{m+1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9a).$$

Ferner ist mit Berücksichtigung der oben aufgestellten Bezeichnungen

$$sp = \beta_1 = -f_1 \operatorname{tg} \alpha_,,$$
$$fg = -\beta_2 = -f_2 \operatorname{tg} \alpha_{m+1},$$

folglich

$$\frac{n_, \beta_1}{f_1} = -\frac{n_{m+1} \beta_2}{f_2}.$$

Setzt man in diese Gleichung aus 8a) den Wert von f_2, so erhält man

$$\frac{n_{,}\beta_1}{f_1 - F_1} = -\frac{n_{m+1}\beta_2}{F_2}$$

und nach 8b) ist

$$\frac{\beta_1}{f_1 - F_1} = -\frac{\beta_2}{F_1}.$$

Beide Gleichungen durch einander dividiert geben

$$\frac{n_{,}}{n_{m+1}} = \frac{F_1}{F_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9\text{c}),$$

was zu beweisen war.

3. In jedem optischen Systeme gibt es ein und nur ein Paar von Knotenpunkten, welche die Eigenschaft haben, daß alle Lichtstrahlen, deren Richtung im ersten Mittel durch den ersten Knotenpunkt geht, nach der letzten Brechung eine ihrer früheren parallele Richtung haben. und durch den zweiten Knotenpunkt gehen. Die durch die Knotenpunkte senkrecht gegen die optische Achse gelegten Ebenen heißen die Knotenebenen. Da die im ersten Knotenpunkte sich schneidenden Lichtstrahlen sich also nach der letzten Brechung im zweiten schneiden, so ist der zweite offenbar das Bild des ersten. Die zu ihnen gehörigen Brennweiten verhalten sich umgekehrt wie die Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mediums.

Wir gehen von der in der vorigen Nummer gefundenen Gleichung 9) aus:

$$n_{,}\gamma_{,}\operatorname{tg}\alpha_{,} = n_{m+1}\gamma_{m+1}\operatorname{tg}\alpha_{m+1}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9).$$

Wenn wir diese auf die Knotenpunkte beziehen, soll $\alpha_{,} = \alpha_{m+1}$ werden. Dies wird der Fall sein, wenn

$$n_{,}\gamma_{,} = n_{m+1}\gamma_{m+1}.$$

Die Lineardimensionen zweier zusammengehöriger in den Knotenebenen liegender Bilder verhalten sich also umgekehrt wie die zugehörigen Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mittels.

Da die Bilder desselben Gegenstandes $\gamma_{,}$ sich verhalten wie ihre Abstände vom zweiten Hauptbrennpunkte, so läßt sich dieser Abstand aus der Größe des Bildes bestimmen. Fällt das Bild des Gegenstandes $\gamma_{,}$ in die zweite Hauptebene, so ist seine Größe auch gleich $\gamma_{,}$, sein Abstand vom Brennpunkte F_2; fällt es in die zweite Knotenebene, so ist seine Größe, wie eben bewiesen,

$$\gamma_{m+1} = \frac{n_{,}}{n_{m+1}}\gamma_{,}.$$

Sein Abstand vom Brennpunkte sei G_2, so ist

$$\frac{\gamma_{,}}{\gamma_{m+1}} = \frac{F_2}{G_2}, \quad \text{also 9c)}$$

$$G_2 = \frac{n_{,}}{n_{m+1}}F_2 = F_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10\text{a}).$$

Der Abstand zwischen der zweiten Haupt- und Knotenebene ist danach

$$\begin{aligned} a_2 &= F_2 - G_2 \\ &= F_2 - F_1. \end{aligned}$$

Die erste Knotenebene soll das Bild der zweiten sein. Nennen wir ihren Abstand von der ersten Hauptebene a_1, so daß

$$a_1 = G_1 - F_1,$$

so ergibt die Gleichung 8a)

$$-\frac{F_1}{a_1} + \frac{F_2}{a_2} = 1, \quad \text{daher}$$

$$a_1 = a_2 = F_2 - F_1$$

$$G_1 = F_2 \quad \text{und} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 10\text{b})$$

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{n_{m+1}}{n_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 10\text{c}).$$

Methoden, die Brenn-, Haupt- und Knotenpunkte eines aus zwei anderen zusammengesetzten zentrierten Systems brechender Kugelflächen zu finden.

Es seien gegeben zwei zentrierte optische Systeme A und B, welche dieselbe Achse haben. Es seien $p_{,}$ und $p_{,,}$, Fig. 38, die beiden Brennpunkte, $a_{,}$ und $a_{,,}$ die beiden Hauptpunkte des Systems A, $\pi_{,}$ und $\pi_{,,}$ die Brennpunkte,

Fig. 38.

$\alpha_{,}$ und $\alpha_{,,}$ die Hauptpunkte von B. Der Abstand des ersten Hauptpunktes α des zweiten vom zweiten $a_{,,}$ des ersten Systems sei d, und dies werde positiv gerechnet, wenn, wie in Fig. 38, $\alpha_{,}$ hinter $a_{,,}$ liegt. Die Hauptbrennweiten des ersten Systems $a_{,}p_{,}$ und $a_{,,}p_{,,}$ bezeichnen wir mit $f_{,}$ und $f_{,,}$, die des zweiten $\alpha_{,}\pi_{,}$ und $\alpha_{,,}\pi_{,,}$ mit $\varphi_{,}$ und $\varphi_{,,}$.

Der erste Brennpunkt des kombinierten Systems ist offenbar das Bild, welches das System A vom ersten Brennpunkte $\pi_{,}$ des Systems B entwirft. Ist $t_{,}$ dieser Punkt, so ist klar, wie auch durch den in der Figur von $t_{,}$ ausgehenden Strahl angedeutet ist, daß Strahlen, welche von $t_{,}$ ausgehen, nach der Brechung im ersten Systeme A in $\pi_{,}$ sich vereinigen und nach der Brechung im zweiten parallel der Achse werden müssen, so daß also $t_{,}$ der Definition des vorderen Brennpunkts entspricht. Die Entfernung $a_{,,}\pi_{,}$ ist gleich $d - \varphi_{,}$; daraus ergibt sich für $a_{,}t_{,}$ der Wert

$$a_{,}t_{,} = \frac{(d - \varphi_{,})f_{,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11\text{a}).$$

Ebenso ist der zweite Brennpunkt des kombinierten Systems das Bild, welches das zweite System B von dem zweiten Brennpunkte $p_{,,}$ des ersten Systems entwirft. Es sei $t_{,,}$ der Ort dieses Bildes, so ist

$$\alpha_{,,}t_{,,} = \frac{(d - f_{,,})\varphi_{,,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11\text{b}).$$

Die beiden Hauptpunkte des kombinierten Systems sollen jeder des anderen Bild sein, und zwar bezieht sich der erste auf den Gang der Licht-

strahlen im ersten Medium, der zweite auf den im letzten. Die beiden Hauptpunkte müssen daher ein beiden gemeinsames Bild in dem mittleren Medium haben, was zwischen den beiden optischen Systemen vorhanden ist. Es sei dieses Bild s in Fig. 38, $r_{,}$ und $r_{,,}$ dagegen die Hauptpunkte des kombinierten Systems. Wenn s das Bild von $r_{,}$, und $r_{,,}$ das Bild von s ist, ist auch $r_{,,}$ das Bild von $r_{,}$, und der ersten Bedingung für die beiden Hauptpunkte geschieht dadurch Genüge. Die zweite Bedingung für diese Punkte ist die, daß zusammengehörige Bilder in den Hauptebenen gleich groß und gleich gerichtet seien. Es sei nun σ die Größe eines Objekts in s, $\beta_{,}$ sein Bild entworfen vom System A in $r_{,}$, $\beta_{,,}$ sein Bild entworfen vom System B in $r_{,,}$, und x gleich der Länge $a_{,,}s$, y gleich $s\alpha_{,}$, so ist nach 8b)

$$\frac{\beta_{,}}{\sigma} = \frac{f_{,,}}{f_{,,} - x}$$

$$\frac{\beta_{,,}}{\sigma} = \frac{\varphi_{,}}{\varphi_{,} - y}.$$

Soll $\beta_{,} = \beta_{,,}$ sein, so muß

$$\frac{f_{,,}}{f_{,,} - x} = \frac{\varphi_{,}}{\varphi_{,} - y} \quad \text{oder}$$

$$\frac{x}{f_{,,}} = \frac{y}{\varphi_{,}} \qquad \text{11c)}$$

$$\text{oder} \quad \frac{a_{,,}s}{a_{,,}p_{,,}} = \frac{\alpha_{,}s}{\alpha_{,}\pi_{,}}.$$

Um also den Punkt im mittleren Medium zu finden, dessen Bilder die beiden Hauptpunkte sind, teile man die Entfernung zwischen dem zweiten Hauptpunkte des ersten und ersten Hauptpunkte des zweiten Systems in zwei Teile, welche sich verhalten wie die zu diesen Hauptpunkten gehörigen Hauptbrennweiten der beiden Systeme.

Da $x + y = d$ ist nach 11c)

$$\frac{x}{f_{,,}} = \frac{d - x}{\varphi_{,}}$$

$$\frac{d - y}{f_{,,}} = \frac{y}{\varphi_{,}}. \quad \text{Daraus folgt}$$

$$x = \frac{d f_{,,}}{\varphi_{,} + f_{,,}}$$

$$y = \frac{d \varphi_{,}}{\varphi_{,} + f_{,,}}.$$

Aus dem Werte von x findet man die Entfernung $a_{,}r_{,} = h_{,}$ des ersten Hauptpunktes des kombinierten Systems vor dem ersten Hauptpunkte des Systems A,

$$h_{,} = \frac{x f_{,}}{x - f_{,,}}$$

$$h_{,} = \frac{d f_{,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}} \qquad \text{11d).}$$

Ebenso die Entfernung $\alpha_{,,}r_{,,} = h_{,,}$ des zweiten Hauptpunktes des kombinierten Systems hinter dem zweiten Hauptpunkte des Systems B,

$$h_{,,} = \frac{\varphi_{,,} y}{y - \varphi_{,}}$$

$$h_{,,} = \frac{d\varphi_{,,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 11\text{e}).$$

Daraus ergeben sich die Werte $F_{,}$ und $F_{,,}$ der Hauptbrennweiten des kombinierten Systems:

$$\left.\begin{aligned} F_{,} &= a_{,} t_{,} - a_{,} r_{,} \\ &= \frac{\varphi_{,} f_{,}}{\varphi_{,} + f_{,,} - d} \\ F_{,,} &= \alpha_{,,} t_{,,} - \alpha_{,,} r_{,,} \\ &= \frac{\varphi_{,,} f_{,,}}{\varphi_{,} + f_{,,} - d} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 11\text{f}).$$

Hat man die Haupt- und Brennpunkte gefunden, so findet man die Knotenpunkte sehr leicht, da der Abstand des ersten Knotenpunktes vom ersten Brennpunkte gleich ist der zweiten Hauptbrennweite, der Abstand des zweiten Knotenpunktes vom zweiten Brennpunkte der ersten Hauptbrennweite.

Will man nur die Knotenpunkte, nicht die Hauptpunkte suchen, so kann man ein ähnliches Verfahren einschlagen wie für die Hauptpunkte, wobei man die Bedingung benutzt, daß die linearen Dimensionen zusammengehöriger Bilder in den Knotenebenen sich umgekehrt wie die Brechungsverhältnisse der betreffenden Media verhalten.

Es seien in Fig. 38 jetzt $a_{,}$ und $a_{,,}$, $\alpha_{,}$ und $\alpha_{,,}$ nicht mehr die Hauptpunkte sondern die Knotenpunkte der beiden Systeme A und B, $r_{,}$ und $r_{,,}$ die Knotenpunkte des kombinierten Systems, ihr gemeinsames Bild im mittleren Medium der Punkt s, so daß nun

$$\begin{aligned} a_{,} p_{,} &= f_{,,} & \qquad \alpha_{,} \pi_{,} &= \varphi_{,,} \\ a_{,,} p_{,,} &= f_{,} & \alpha_{,,} \pi_{,,} &= \varphi_{,} \\ a_{,,} s &= x & \alpha_{,} s &= y\,. \end{aligned}$$

Es ist

$$a_{,} r_{,} = \frac{x f_{,,}}{x - f_{,}}$$

$$\alpha_{,,} r_{,,} = \frac{y \varphi_{,}}{y - \varphi_{,,}}.$$

Ist nun σ die lineare Größe eines Objekts im Punkte s des mittleren Mediums, $\beta_{,}$ die seines vom System A in $r_{,}$ entworfenen Bildes, $\beta_{,,}$ die seines vom System B in $r_{,,}$ entworfenen Bildes, so ist nach den bekannten Eigenschaften der Knotenpunkte

$$\frac{\beta_{,}}{\sigma} = \frac{a_{,} r_{,}}{x} = \frac{f_{,,}}{x - f_{,}}$$

$$\frac{\beta_{,,}}{\sigma} = \frac{\alpha_{,,} r_{,,}}{y} = \frac{\varphi_{,}}{y - \varphi_{,,}}.$$

Da nun in den Knotenebenen, wenn $n_{,}$ das Brechungsverhältnis des ersten, $n_{,,}$ des letzten, ν des mittleren Mittels ist, sein muß

$$n_, \beta_, = n_{,,} \beta_{,,}, \text{ so folgt, daß}$$

$$\frac{n_, f_{,,}}{x - f_,} = \frac{n_{,,} \varphi_,}{y - \varphi_{,,}}.$$

Nun ist aber

$$n_, f_{,,} = \nu f_,$$

$$n_{,,} \varphi_, = \nu \varphi_{,,}, \quad \text{also}$$

$$\frac{f_,}{x - f_,} = \frac{\varphi_{,,}}{y - \varphi_{,,}} \quad \text{und}$$

$$\frac{x}{f_,} = \frac{y}{\varphi_{,,}} \quad \text{oder}$$

$$\frac{a_{,,} s}{a_{,,} p_{,,}} = \frac{\alpha_, s}{\alpha_, \pi_,}.$$

Diese selbe Gleichung hatten wir aber auch gefunden in 11c), als wir angenommen hatten, daß die Punkte $a_,$, $a_{,,}$, $\alpha_,$, $\alpha_{,,}$, $r_,$ und $r_{,,}$ Hauptpunkte seien. Zur Auffindung der Knotenpunkte des kombinierten Systems verfährt man also ganz wie zur Auffindung seiner Hauptpunkte, nur daß man dabei von den Knotenpunkten der einzelnen Systeme, nicht von den Hauptpunkten ausgeht.

Wir wollen hier noch die Formeln für den einfachsten Fall hinschreiben, wo jedes der beiden verbundenen Systeme nur aus einer einzelnen Kugelfläche besteht. Es sei r_1 der Radius der ersten, r_2 der der zweiten Fläche, d ihr Abstand voneinander, n_1 das Brechungsverhältnis des ersten, n_2 des zweiten, n_3 des dritten Mittels. Dann ist nach 3a) und 3b)

$$f_1 = \frac{n_1 r_1}{n_2 - n_1} \qquad \varphi_1 = \frac{n_2 r_2}{n_3 - n_2}$$

$$f_2 = \frac{n_2 r_1}{n_2 - n_1} \qquad \varphi_2 = \frac{n_3 r_2}{n_3 - n_2}.$$

Setzen wir der Kürze wegen

$$n_2 (n_3 - n_2) r_1 + n_2 (n_2 - n_1) r_2 - (n_3 - n_2)(n_2 - n_1) d = N,$$

so sind die Hauptbrennweiten:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{n_1 n_2 r_1 r_2}{N} \\ F_2 &= \frac{n_2 n_3 r_1 r_2}{N} \end{aligned} \right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 12).$$

Die Entfernungen der Hauptpunkte h_1 und h_2 von den Flächen

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{n_1 (n_2 - n_3) d r_1}{N} \\ h_2 &= \frac{n_3 (n_1 - n_2) d r_2}{N} \end{aligned} \right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 12a).$$

Die Entfernung der Hauptpunkte voneinander H

$$H = d \cdot \frac{(n_2 - n_1)(n_3 - n_2)(r_1 - r_2 - d)}{N} \quad \ldots\ldots \quad 12b)$$

Für $d = 0$ wird $h_1 = h_2 = H = 0$

$$F_1 = \frac{n_1 r_1 r_2}{(n_3 - n_2) r_1 + (n_2 - n_1) r_2}$$

$$F_2 = \frac{n_3 r_1 r_2}{(n_3 - n_2) r_1 + (n_2 - n_1) r_2}.$$

Setzen wir hierin $r_2 = r_1$, so erhalten wir

$$F_1 = \frac{n_1 r_1}{n_3 - n_1}$$

$$F_2 = \frac{n_3 r_1}{n_3 - n_1}.$$

Die Brennpunkte und Hauptpunkte sind dann also genau dieselben, als wäre nur eine brechende Fläche vorhanden; das Resultat ist unabhängig von n_2. Daraus folgt:

In einem Systeme von brechenden Kugelflächen können wir uns an jeder brechenden Fläche eine unendlich dünne, durch konzentrische Kugelflächen begrenzte Schicht von beliebigem Brechungsverhältnisse eingeschoben denken, ohne die Brechung der Strahlen dadurch zu ändern.

Es wird uns dieser Satz später zur Vereinfachung mancher Betrachtungen dienen.

Endlich will ich noch die Formeln für Linsen mit zwei kugeligen Begrenzungsflächen hersetzen, bei denen das erste und letzte Mittel einander gleich sind, also $n_1 = n_3$.

$$F_1 = F_2 = \frac{n_1 n_2 r_1 r_2}{(n_2 - n_1)[n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) d]} \quad \ldots \quad 13).$$

Die Entfernungen der Hauptpunkte, welche in diesem Falle mit den Knotenpunkten zusammenfallen, von den Linsenflächen sind

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{n_1 d r_1}{n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) d} \\ h_2 &= -\frac{n_1 d r_2}{n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) d} \end{aligned} \right| \quad \ldots \ldots \quad 13a.$$

Die Entfernung der Hauptpunkte voneinander

$$H = d \cdot \frac{(n_2 - n_1)(d + r_2 - r_1)}{n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) d} \quad \ldots \ldots \quad 13b).$$

Die beiden ersten sind positiv gerechnet, wenn sie außerhalb der Linse liegen.

Den Punkt in der Linse, dessen Bilder die beiden Knotenpunkte sind, nennt man in diesem Falle das optische Zentrum der Linse. Es liegt in der optischen Achse, und seine Entfernungen von den beiden Flächen verhalten sich zueinander wie die Radien dieser Flächen.

Da die Resultate der Brechung in einem optischen Systeme, was Größe und Lage der Bilder betrifft, nur von der Lage der Brennpunkte und Hauptpunkte (oder Knotenpunkte) abhängen, so kann man ohne Änderung der Lage und Größe der Bilder zwei optische Systeme füreinander substituieren, deren

Brennpunkte und Hauptpunkte dieselbe Lage haben. Da das Verhältnis des Brechungsvermögens des ersten und letzten Mittels nicht geändert werden kann, ohne das Verhältnis der Hauptbrennweiten zueinander zu ändern, wollen wir voraussetzen, daß das erste und letzte Mittel bei einer solchen Substitution ungeändert bleibe. Dann braucht nur die eine Hauptbrennweite und der Abstand der Hauptpunkte voneinander in dem einen System gleich den entsprechenden Größen des andern gemacht zu werden, um die beiden Systeme füreinander substituieren zu können. In einem Systeme von nur zwei brechenden Flächen würde man zur Erfüllung dieser Bedingungen über 4 Größen, r_1, r_2, n_2 und d, bestimmen können. Es kann daher für jedes zentrierte System brechender Kugelflächen ein System von nur zwei solchen Flächen gesetzt werden, welches ebenso große und ebenso gelegene Bilder entwirft wie jenes, und im allgemeinen kann man dabei sogar noch immer zwei andere Bedingungen für das System von zwei Flächen aufstellen, z. B. daß es aus einem bestimmten Stoffe zu bilden sei usw., und diese gleichzeitig erfüllen.

Für den Fall, wo das erste und letzte Mittel identisch sind, beide ein kleineres Brechungsvermögen haben als das mittlere Mittel, und der Abstand der brechenden Flächen kleiner ist als die Krümmungsradien, also für die sogenannten Linsen, will ich hier noch die einzelnen Fälle durchgehen, weil wir auf dergleichen Linsen oft zurückkommen werden.

Man unterscheidet nach der Gestalt 1. bikonvexe Linsen, bei denen beide Flächen konvex, also r_1 positiv, r_2 negativ ist; die Brennweite ist immer positiv nach Gleichung 13). Die Abstände der Hauptpunkte von den Flächen sind negativ, d. h. diese Punkte liegen innerhalb der Linse, und der Abstand der Hauptpunkte voneinander ist positiv, d. h. der erste liegt vor dem zweiten. In Fig. 39 ist die Lage der Brennpunkte $p_1 p_2$ und Hauptpunkte h_1 und h_2 einer bikonvexen Linse dargestellt. Die erste und zweite Fläche der Linse sind mit *1* und *2* bezeichnet. Ein Grenzfall der bikonvexen Linsen sind die plankonvexen, bei denen einer der Radien unendlich groß wird, und ein Hauptpunkt in die gekrümmte Fläche der Linse fällt.

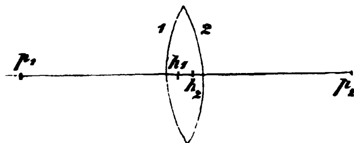


Fig. 39.

2. Bikonkave Linsen mit zwei konkaven Flächen; r_1 ist negativ, r_2 positiv. Die Brennweiten sind negativ, die Abstände der Hauptpunkte von den Flächen beide negativ, d. h. die Hauptpunkte liegen innerhalb der Linse. Ihr Abstand ist positiv, d. h. der erste liegt vor dem zweiten. Fig. 40 stellt die Lage der Hauptpunkte h_1 und h_2, sowie der Brennpunkte p_1 und p_2 einer bikonkaven Linse dar. Einen Grenzfall bilden die plankonkaven Linsen, bei denen einer der Radien unendlich wird und einer der Hauptpunkte in die gekrümmte Fläche fällt.

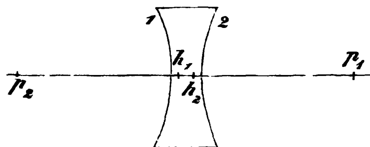


Fig. 40.

3. Konkavkonvexe Linsen, beide Radien entweder positiv oder negativ Wir wollen das erstere annehmen; der zweite Fall ergibt sich aus diesem sogleich, wenn wir nachher die erste Seite der Linse zur zweiten machen. Die Brennweite wird positiv, wenn

$$n_2 (r_2 + d - r_1) > n_1 d;$$

sie wird unendlich, wenn beide Seiten der Gleichung gleich sind; sie wird negativ, wenn der Ausdruck links kleiner als der rechts ist. Der Ausdruck $r_2 + d - r_1$ ist der Abstand des Krümmungsmittelpunkts der zweiten Fläche von dem der ersten nach hinten gerechnet. Liegt der zweite Mittelpunkt hinter dem ersten, so wird die Linse von ihrer Mitte nach dem Rande zu dünner; liegt jener vor dem ersten, so wird sie dicker. Man kann also sagen: Wird eine konkavkonvexe Linse nach dem Rande zu dicker, so ist ihre Brennweite negativ, und soll ihre Brennweite positiv sein, so muß sie nach dem Rande hin dünner werden. Aber man darf beide Sätze nicht umkehren, wie es oft geschieht.

Der erste Hauptpunkt liegt vor der konvexen Fläche (d. h. an ihrer konvexen Seite), wenn die Brennweite positiv ist, entfernt sich sehr weit, bis in das Unendliche, wenn die Brennweite selbst sehr groß und unendlich wird. Wird die Brennweite negativ, so liegt der erste Hauptpunkt hinter der konvexen Fläche der Linse, d. h. auf ihrer konkaven Seite, ebenfalls unendlich weit entfernt, wenn die Brennweite unendlich sein sollte.

Der zweite Hauptpunkt liegt vor der konkaven Fläche der Linse, d. h. auf ihrer konvexen Seite, wenn die Brennweite der Linse positiv, er liegt hinter dieser Fläche, wenn die Brennweite negativ ist, und rückt ebenfalls in das Unendliche hinaus, wenn die Brennweite unendlich groß wird. Bei einer positiven Brennweite liegt der zweite Hauptpunkt immer hinter dem ersten, d. h. der Linse näher. Bei einer negativen liegt er hinter dem ersten, d. h. der Linse ferner, wenn die Linse nach ihrem Rande zu dicker wird; er liegt dagegen vor dem ersten, wenn die Linse bei negativer Brennweite von der Mitte nach dem Rande dünner wird; er fällt mit ihm zusammen, wenn die beiden Linsenflächen konzentrischen Kugeln angehören, und zwar liegen beide Hauptpunkte dann in dem gemeinschaftlichen Zentrum der Kugeln. Fig. 41 stellt eine konkavkonvexe Linse von positiver Brennweite dar, Fig. 42 eine solche von negativer Brennweite, die nach dem Rande zu dicker wird, Fig. 43 eine solche von negativer Brennweite, welche nach dem Rande zu dünner wird. Der Krümmungsmittelpunkt der ersten Fläche ist mit c_1, der der zweiten mit c_2 bezeichnet. Ich bemerke noch, daß die Brennpunkte nie in die Linse und stets auf entgegengesetzte Seiten derselben fallen.* Was die Lage der Bilder betrifft, so verwandelt sich die Gleichung 8a) und 8b), wenn die beiden Brennweiten gleich werden, in folgende:

Fig. 41.

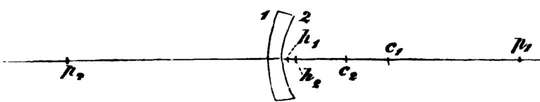


Fig. 42.

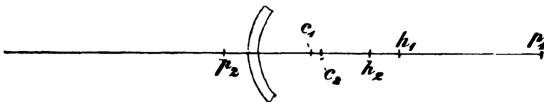


Fig. 43.

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F} \quad \text{oder} \qquad 14)$$

$$f_2 = \frac{F f_1}{f_1 - F} \qquad 14a)$$

* Diese Bemerkung bezieht sich nur auf den letzterwähnten Linsentypus. G.

und

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{F}{F - f_1} = \frac{F - f_2}{F} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 14\text{b}).$$

Bei Linsen mit positiver Brennweite (Sammellinsen, Kollektivlinsen) liegen nach diesen Formeln die Bilder unendlich weit entfernter reeller Objekte, für welche also $f_1 = \infty$, im zweiten Brennpunkte hinter der Linse und sind im Verhältnis zum Objekte unendlich klein und umgekehrt. Wenn das Objekt sich der Linse nähert, entfernen sich die Bilder von ihr, bleiben reell umgekehrt und nehmen an Größe zu, bis $f_1 = F$ geworden, das Objekt also in den vorderen Brennpunkt gerückt ist, wo die Entfernung und Größe des Bildes unendlich werden. Man ersieht dies leicht aus Gleichung 14), die man so schreiben kann:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{F} - \frac{1}{f_1}.$$

Wenn f_1 abnimmt von ∞ bis F, nimmt $\frac{1}{f_1}$ zu von 0 bis $\frac{1}{F}$, und $\frac{1}{f_2}$ nimmt ab von $\frac{1}{F}$ bis 0, d. h. f_2 nimmt zu von F bis ∞. Die Größe des Bildes

$$\beta_2 = -\beta_1 \frac{F}{f_1 - F}$$

ist immer negativ, solange $f_1 > F$. Wenn f_1 von ∞ abnimmt bis F, nimmt der Nenner des Bruchs ab von ∞ bis 0, und β_2 geht über von 0 bis $-\infty$.

Ebenso findet man nun weiter, daß, wenn das Objekt vom ersten Brennpunkte zum ersten Hauptpunkte fortrückt, f_2 von $-\infty$ bis 0 geht, d. h. das Bild, welches nun meist virtuell ist und auf derselben Seite der Linse mit dem Objekte liegt, aus unendlicher Entfernung bis zum zweiten Hauptpunkte heranrückt und dabei eine positive Größe hat, d. h. aufrecht steht und von $+\infty$ bis zu einer dem Objekte gleichen Größe abnimmt.

Endlich kann f_1 auch negativ werden, wobei meist das Objekt virtuell wird; dann ist f_2 stets positiv und kleiner als f_1, das Bild aufrecht und kleiner als das Objekt. Während f_1 von 0 bis $-\infty$, geht f_2 von 0 bis F, β_2 von β_1 bis 0.

Man kann also sagen: Sammellinsen machen parallel eintretende Strahlen konvergent und vereinigen sie in der Brennebene; sie machen konvergente Strahlen noch konvergenter und divergente Strahlen weniger divergent oder auch konvergent, ersteres, wenn sie von einem Punkte jenseits des Brennpunktes divergieren, letzteres, wenn von einem solchen diesseits des Brennpunktes.

Linsen von negativer Brennweite nennen wir dispansive oder Zerstreuungslinsen, weil parallel eintretende Strahlen durch sie divergent gemacht, zerstreut werden, divergente noch mehr divergent, konvergente weniger konvergent oder divergent werden.

Setzen wir den absoluten Wert der negativen Brennweite der Linse gleich P, so daß $P = -F$, so wird

$$\frac{1}{f_2} = -\frac{1}{P} - \frac{1}{f_1}$$

$$\beta_2 = \beta_1 \frac{P}{f_1 + P}.$$

Daraus folgt, daß für jeden positiven Wert von f_1 jetzt f_2 negativ ist, und daß, während f_1 von ∞ bis 0 abnimmt, f_2 von $-P$ bis 0 sich verändert, β_2 von 0 bis β_1. Dispansive Linsen entwerfen also von reellen Objekten, die vor dem ersten Hauptpunkte liegen, virtuelle Bilder, welche vor dem zweiten Hauptpunkte liegen, kleiner, näher und aufrecht sind.

Für negative Werte von f_1, welche absolut kleiner als P sind, wird f_2 positiv, und während f_1 von 0 bis $-P$ geht, steigt f_2 von 0 bis $+\infty$, β_2 von β_1 bis ∞. Konvergent einfallende Strahlen werden also weniger konvergent. wenn sie nach einem vor dem hinteren Brennpunkte gelegenen Punkte konvergieren.

Für negative Werte von f_1, welche absolut größer sind als P, werden f_2 und β_2 negativ, es entstehen also umgekehrte virtuelle Bilder vor dem Glase. Während f_1 sich ändert von $-P$ bis $-\infty$, ändert sich f_2 von $-\infty$ bis $-P$, und β_2 von $-\infty$ bis 0. Konvergente Strahlen werden von dispansiven Linsen also divergent gemacht, wenn sie nach einem jenseits des hinteren Brennpunktes gelegenen Punkte konvergieren.

Die Entfernung e zweier zusammengehöriger Bilder voneinander ist $f_1 + a + f_2$, wenn a der Abstand der Hauptpunkte voneinander ist, und diese Entfernung positiv gerechnet wird, falls das zweite Bild hinter dem ersten liegt. Setzen wir statt f_2 seinen Wert, so erhalten wir als Ausdruck für die Entfernung:

$$e = \frac{f_1^{\,2}}{f_1 - F} + a .$$

Differentiieren wir diese Gleichung nach f_1, so erhalten wir

$$\frac{de}{df_1} = \frac{f_1^{\,2} - 2 f_1 F}{(f_1 - F)^2} .$$

Hiernach wird $de = 0$, d. h. e ein Maximum oder Minimum, wenn entweder $f_1 = 0$ oder $f_1 = 2F$, und zwar wird es sowohl für positive wie negative Brennweiten ein Minimum für $f_1 = 2F$, und ein Maximum für $f_1 = 0$, wie man leicht aus dem Ausdruck für e erkennt.

Werke, in welchen die Brechung der Lichtstrahlen in zentrierten Systemen kugeliger Flächen behandelt wird, sind folgende:

1738. Cotes in Smith, *A complete system of optics.* Cambridge. Vol. II. p. 76.

1757 u. 61. Euler in *Histoire de l'Acad. roy. de Berlin pour* 1757. p. 283. — Ibid. *pour* 1761. p. 201.

1765. Euler, *Précis d'une théorie générale de la dioptrique* in *Hist. de l'acad. roy. des sc. de Paris,* 1765. p. 555.

1778 u. 1803. Lagrange in *Nouv. Mém. de l'acad. roy. de Berlin pour* 1778. p. 162. — Ibid. 1803. p 1.

1822. Piola in *Effemeridi astron. di Milano per* 1822.

1830. Möbius in Crelles Journal für Mathematik. Bd. V. S. 113.

1841. *Bessel in Astronom. Nachrichten. Bd. XVIII. S. 97.
*Gauss, Dioptrische Untersuchungen. Göttingen. — Abdruck aus Abhandl. d. Kön. Ges. d. Wiss. zu Göttingen. T. 1. von den Jahren 1838—43.

1844. Encke, De formulis dioptricis. Ein Programm. Berlin.
Moser, Über das Auge, in Doves Repert. d. Physik. Bd. V. S. 289.

1851. Listing, Art. Dioptrik des Auges, in R. Wagners Handwörterbuch d. Physiologie. Bd. IV. S. 451.

§ 10. Brechung der Strahlen im Auge.*

Das Auge verhält sich gegen das einfallende Licht im wesentlichen wie eine *Camera obscura*. Das von einem leuchtenden Punkte ausgegangene Licht muß, wenn dieser Punkt deutlich gesehen werden soll, durch die brechenden Mittel des Auges so gebrochen werden, daß alles auch wieder auf einem Punkte der Netzhaut vereinigt wird. Auf der Fläche dieser Haut wird daher ein reelles optisches Bild der äußeren gesehenen Gegenstände entworfen. Dasselbe ist umgekehrt und verkleinert. Man kann es an frisch ausgeschnittenen Augen sichtbar machen, wenn man vorsichtig den hinteren mittleren Teil der Sclerotica und Chorioidea entfernt, die Netzhaut aber stehen läßt, und nun die Hornhaut eines so präparierten Auges gegen helle Gegenstände kehrt. Das Bild erscheint alsdann klein, hell, scharf und, wie angegeben, umgekehrt auf der stehengebliebenen Netzhaut. Noch besser ist das Bildchen nach der Methode von GERLING[1] zu sehen, wenn man die Elemente der Netzhaut mit einem Pinsel entfernt, und dann ein Täfelchen von Glas oder Glimmer in die Öffnung einschiebt. Ohne viele Mühe kann man die Netzhautbildchen auch in den Augen weißer Kaninchen sehen, denen das Pigment der Aderhaut fehlt. Bei diesen braucht man nicht einmal die harte Haut zu entfernen, sondern sieht das Bild durch sie hindurchscheinen, allerdings nicht so scharf wie bei freigelegter Netzhaut, aber doch deutlich genug, um seine Stellung, Größe usw. zu erkennen. Auch ist es bei lebenden Menschen, namentlich bei blonden Personen mit hellblauen Augen, welche wenig Pigment in der Aderhaut zu haben pflegen, zuweilen möglich, das Bild durch die harte Haut hindurch zu sehen. Man läßt einen solchen in einem verdunkelten Zimmer das Auge so drehen, daß die Hornhaut im äußeren Augenwinkel steht, und in dem größeren mittleren und inneren Teile der Augenlidspalte daher die innere Seite der weißen Sehnenhaut erscheint. Hält man dann noch weiter seitlich, als die seitlich gekehrte Sehachse steht, eine Kerzenflamme, so erscheint deren Bild auf der inneren Seite der Netzhaut, und schimmert oft so deutlich durch die weiße Sehnenhaut hindurch, daß man die umgekehrte Stellung des Bildes, die Spitze der Flamme und den Ort des Dochtes erkennen kann[2].

Die genaueste Untersuchung der Netzhautbildchen im lebenden Auge des Menschen ist mittels des in § 16 zu beschreibenden Augenspiegels möglich. Mit diesem Instrumente kann man von vorn in das Auge hineinblicken, und die Netzhaut selbst mit ihren Gefäßen, sowie die auf ihr entworfenen optischen Bilder deutlich sehen. Man überzeugt sich leicht davon, daß von hinreichend hellen Objekten, welche das beobachtete Auge deutlich sieht, sehr scharfe und genau begrenzte optische Bilder auf der Fläche der Netzhaut entworfen werden.

Bei der Beschreibung der Netzhaut habe ich schon erwähnt, daß im Hintergrunde des Auges sich eine eigentümlich gebaute Stelle der Netzhaut finde, der gelbe Fleck. In seiner Mitte, der sogenannten Netzhautgrube, verschwinden die Gefäße ganz, welche sich in den übrigen Teilen der Netzhaut verästeln, hier finden sich nur nervöse Elemente vor, und zwar von den

* Vgl. Kap. 2 der nach dem ersten Abschnitt folgenden Zusätze! G.

[1] POGGENDORFF, Ann. XLVI. 243.
[2] VOLKMANN, Artikel: Sehen in WAGNERS Handwörterbuch d. Physiologie. S. 286—289.

Schichten der Netzhaut, wie es scheint, nur Nervenzellen und Zapfen. Diese Stelle ist in physiologischer Hinsicht von der größten Wichtigkeit als die Stelle des direkten Sehens. Derjenige Punkt des Gesichtsfeldes, welchen wir direkt betrachten, oder mit dem Blicke fixieren, wird jedesmal an dem Orte der Netzhautgrube abgebildet. Mittels des Augenspiegels kann dieser Satz, von dessen Richtigkeit man sich schon längst wegen der besonderen Struktur des gelben Flecks überzeugt hielt, auch durch direkte Beobachtungen erwiesen werden. Den Ort des gelben Flecks erkennt man mit dem Augenspiegel, wenn die ganze Netzhaut erleuchtet ist, an dem Mangel der Gefäße. In der Mitte der gefäßlosen Stelle, entsprechend dem Orte der Netzhautgrube, findet sich eine eigentümlich helle Stelle, welche Coccius[1] zuerst beschrieben hat, und deren Helligkeit er einem Reflexe der Netzhautgrube zuschreibt. Donders[2] hat ferner gezeigt, daß dieser helle Reflex stets an derjenigen Stelle des optischen Bildes erscheint, welche das beobachtete Auge im Gesichtsfelde fixiert, und ich habe mich von der Richtigkeit dieser Angabe überzeugt. Man kann nach der Stellung des sogenannten Reflexes der Netzhautgrube dem beobachteten Individuum genau bezeichnen, welchen Punkt es fixiert, und wenn man ihm Anweisung gibt, bald diesen, bald jenen Punkt des Gegenstandes zu fixieren, sieht man den Reflex immer auf den entsprechenden Punkt des Bildes sich einstellen. Die Ausführung dieser Versuche wird in § 16 beschrieben werden.

Nur in der Gegend der Augenachse pflegt das optische Bild auf der Netzhaut seine volle Schärfe zu haben, von ihr entfernter ist es weniger gut begrenzt. Wir sehen deshalb im Gesichtsfelde in der Regel nur den einen Punkt deutlich, welchen wir fixieren, alle übrigen undeutlich. Diese Undeutlichkeit im indirekten Sehen scheint übrigens auch durch eine geringere Empfindlichkeit der Netzhaut bedingt zu sein; sie ist schon in geringer Entfernung von dem fixierten Punkte viel bedeutender als die objektive Undeutlichkeit der Netzhautbilder. Das Auge stellt ein optisches Werkzeug von sehr großem Gesichtsfelde dar, aber nur an einer kleinen, sehr engbegrenzten Stelle dieses Gesichtsfeldes sind die Bilder deutlich. Das ganze Feld entspricht einer Zeichnung, in der nur der wichtigste Teil des Ganzen sorgfältig ausgeführt, die Umgebungen aber nur skizziert, und zwar desto roher skizziert sind, je weiter sie von dem Hauptgegenstande abstehen. Durch die Beweglichkeit des Auges wird es aber möglich, nacheinander jeden einzelnen Punkt des Gesichtsfeldes genau zu betrachten. Da wir zu einer Zeit doch nur einem Gegenstande unsere Aufmerksamkeit zuwenden können, ist der eine deutlich gesehene Punkt ausreichend, sie vollständig zu beschäftigen, so oft wir sie auf Einzelheiten lenken wollen, und wiederum ist das große Gesichtsfeld trotz seiner Undeutlichkeit geeignet, die Hauptzüge der ganzen Umgebung mit einem schnellen Blicke aufzufassen, und neu auftauchende Erscheinungen an den Seiten des Gesichtsfeldes sogleich zu bemerken.

Das Gesichtsfeld eines einzelnen Auges wird bestimmt durch die Weite der Pupille und ihre Lage zum Rande der Hornhaut. Ich finde, daß ich in einem dunklen Zimmer, wenn ich mein Auge in einem Spiegel besehe, und seitlich ein Licht aufstelle, die Anwesenheit des Lichts solange noch wahrnehme, als Strahlen von dem Lichte auf den gegenüberliegenden Rand der Pupille und in

---

[1] Über die Anwendung des Augenspiegels. Leipzig 1853. S. 64.

[2] Onderzoekingen gedaan in het Physiolog. Laborat. d. Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. S. 133.

diese selbst fallen. Alles Licht also, was durch die Hornhaut in die Pupille fällt, wird noch empfindliche Teile der Netzhaut treffen. Die Pupille liegt zwar etwas weiter zurück als der äußere Hornhautrand, aber wegen der Brechung in der Hornhaut können selbst noch Strahlen in sie einfallen, welche senkrecht gegen die Augenachse verlaufend auf den Rand der Hornhaut fallen, so daß das Gesichtsfeld eines einzelnen Auges etwa einer halben Kugel entspricht, eine Größe, welche keinem künstlichen optischen Instrumente zukommt. Individuelle Verschiedenheiten müssen darin vorkommen, abhängig von der Weite und Lage der Pupille. Da beim Sehen für die Nähe die Pupille sich der Hornhaut nähert, wird das Gesichtsfeld dabei etwas größer, wie ich an meinen Augen wenigstens leicht erkennen kann, wenn ich am äußersten Rande des Gesichtsfeldes ein recht helles Licht anbringe.

Ein Teil des Gesichtsfeldes jedes einzelnen Auges nach innen, oben und unten wird durch Teile des Antlitzes, Nase, Augenbrauenrand, Wangen, eingenommen, nur nach außen hin ist es ganz frei. Beide Augen zusammen überschauen aber, wenn ihre Achsen parallel in die Ferne gerichtet sind, einen horizontalen Bogen von 180 oder mehr Graden. Vergrößert wird das überschaubare Feld noch durch die Bewegungen der Augen, auf welche wir später zurückkommen.

Die Lichtstrahlen, welche von einem entfernteren leuchtenden Punkte auf das Auge fallen, werden zuerst von der Hornhaut gebrochen, und zwar so, daß sie ungestört weitergehend sich etwa 10 mm hinter der Netzhaut in einem Punkte vereinigen würden. Indem sie somit konvergierend durch die vordere Augenkammer gehen, treffen sie auf die Kristallinse, werden von dieser noch konvergenter gemacht, und können infolgedessen nun schon auf der Netzhaut zur Vereinigung gelangen.

Die stärksten Brechungen der Lichtstrahlen geschehen an der Hornhaut, demnächst an der vorderen und hinteren Fläche der Kristallinse. Aber auch im Innern der Kristallinse finden an den Grenzen ihrer einzelnen Schichtflächen Brechungen statt, da diese Schichten von verschiedener Dichtigkeit sind. Wir können diese verschiedenen brechenden Flächen annähernd gleichsetzen einem System von Rotationsflächen, deren Achsen alle in eine gerade Linie zusammenfallen. Wenn auch kleine Abweichungen in der Lage der Achsen der einzelnen Flächen bei den meisten menschlichen Augen vorzukommen scheinen, so sind diese doch so gering, daß wir sie in bezug auf die Lage und Größe der optischen Bilder vernachlässigen und das Auge als ein zentriertes optisches System betrachten können.

Die Achse dieses Systems, deren vorderes Ende etwa mit dem Mittelpunkte der Hornhaut zusammenfällt, während das hintere zwischen dem gelben Flecke und der Eintrittsstelle des Sehnerven hindurchgeht, nennen wir die Augenachse.

Die Lage der Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte des Auges unterliegt wohl ziemlich bedeutenden individuellen Verschiedenheiten, da überhaupt die meisten Abmessungen des Auges und seiner einzelnen brechenden Flächen bei verschiedenen Menschen so voneinander abweichen, wie man es bei einem Organe, dessen Wirkungen eine so große Genauigkeit der Konstruktion zu verlangen scheinen, kaum erwarten sollte. Außerdem werden wir weiter unten sehen, daß auch in jedem einzelnen Auge diese Punkte ihre Lage ändern, wenn das Auge nacheinander Gegenstände in verschiedener Entfernung betrachtet. Man kann über die Lage der genannten Punkte im normalen, fern-

sehenden Auge nur etwa so viel sicher aussagen: Der erste Hauptpunkt ist dem zweiten Hauptpunkte sehr nahe, ebenso der erste dem zweiten Knotenpunkte. Die beiden Hauptpunkte des Auges liegen etwa in der Mitte der vorderen Augenkammer, die beiden Knotenpunkte sehr nahe der hinteren Fläche der Linse, der zweite Brennpunkt auf der Netzhaut.

Da es bei sehr vielen Gelegenheiten notwendig ist, wenigstens angenäherte Werte für die einzelnen optischen Konstanten des Auges zu kennen, so will ich hier die Werte anführen, welche LISTING für ein schematisches mittleres Auge gewonnen hat, indem er, den bis dahin angeführten Messungen sich möglichst anschließend, einfache abgerundete Zahlen für die hier in Betracht kommenden Größen wählte.

LISTING nimmt an

1. das Brechungsvermögen der Luft gleich 1
2. das Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit . . . . $\frac{103}{77}$
3. Brechungsvermögen der Kristallinse . . . . $\frac{16}{11}$
4. Brechungsvermögen des Glaskörpers . . . . $\frac{103}{77}$
5. Krümmungshalbmesser der Hornhaut . . . . 8 mm
6. Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche . . . . . 10 „
7. Krümmungshalbmesser der hinteren Linsenfläche . . . . . 6 „
8. Entfernung der vorderen Hornhaut- und vorderen Linsenfläche 4 „
9. Dicke der Linse . . . . 4 „

Er berechnet aus diesen Annahmen:

1. Der erste Brennpunkt liegt 12,8326 mm vor der Hornhaut, der zweite Brennpunkt 14,6470 mm hinter der Hinterfläche der Linse.
2. Der erste Hauptpunkt liegt 2,1746 mm, der zweite 2,5724 mm hinter der Vorderfläche der Hornhaut, ihr gegenseitiger Abstand beträgt 0,3978 mm.
3. Der erste Knotenpunkt liegt 0,7580 mm, der zweite 0,3602 mm vor der Hinterfläche der Linse.
4. Die erste Hauptbrennweite des Auges beträgt hiernach 15,0072 mm, die zweite 20,0746 mm.

Die Lage der Hauptpunkte $h_{,}$ und $h_{,,}$, Knotenpunkte $k_{,}$ und $k_{,,}$, Brennpunkte $F_{,}$ und $F_{,,}$ nach LISTING ist in Fig. 44 angegeben. Unter den von LISTING der Berechnung zugrunde gelegten Werten könnten allein die des Brechungsvermögens und der Krümmungsradien der Linse zweifelhaft erscheinen. Doch stimmt die daraus berechnete Brennweite der Linse so gut mit direkten Messungen, die ich selbst ausgeführt habe, daß die optische Wirkung der Linse in LISTINGs schematischem Auge jedenfalls nicht wesentlich von der des natürlichen Auges abweicht. Die Werte, welche für die Brechung in der Hornhaut wichtig sind, sind durch Messungen hinreichend begründet. Wir brauchen also nicht zu zweifeln, daß LISTINGs Schema mit dem natürlichen Verhältnisse wirklich so gut übereinstimmt, als es bei der großen Breite der individuellen Unterschiede möglich ist.

Vermittelst der angegebenen Kardinalpunkte des Auges läßt sich der Weg eines gegebenen einfallenden Strahls nach der letzten Brechung vermöge der

in § 9 vorgeschriebenen Konstruktion finden; ebenso der Ort des Bildes eines beliebigen, in der Nähe der Augenachse liegenden leuchtenden Punktes. Da übrigens sowohl die beiden Hauptpunkte des Auges, als auch die beiden Knotenpunkte einander sehr nahe liegen, so kann man ohne erhebliche Beeinträchtigung der Genauigkeit des Resultats die beiden Hauptpunkte in einen Punkt zusammenziehen und ebenso die beiden Knotenpunkte. Man erhält dadurch ein noch mehr vereinfachtes Schema des Auges, welches Listing das reduzierte Auge nennt. Er legt den einfachen Hauptpunkt eines solchen Auges 2,3448 mm hinter die Vorderfläche der Hornhaut, den Knotenpunkt x Fig. 44 0,4764 mm vor die hintere Fläche der Linse, die Brennpunkte bleiben unverändert. Die Wirkung des reduzierten Auges würde durch eine brechende Kugelfläche hervorgebracht werden können, deren Mittelpunkt der Knotenpunkt wäre, und deren Scheitel im Hauptpunkt läge, während sich vor ihr Luft, hinter ihr wässrige

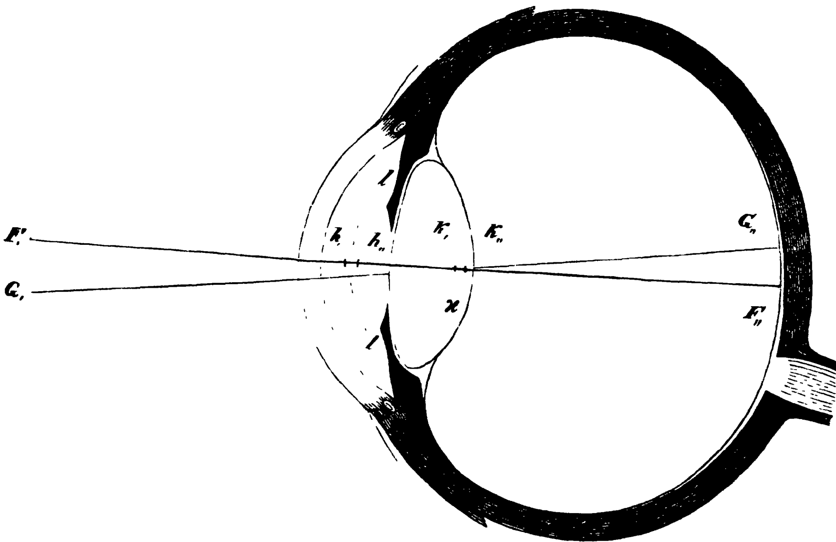


Fig. 44.

Feuchtigkeit oder Glaskörper befände. Der Krümmungshalbmesser einer solchen Fläche würde 5,1248 mm betragen. Bei vielen theoretischen Betrachtungen, wo es nur auf die Größe und Lage der Bilder ankommt, kann man sich durch Anwendung dieses reduzierten Schemas des Auges die Untersuchung sehr erleichtern. In Fig. 44 ist die brechende Kugelfläche des reduzierten Auges durch den gestrichelten Bogen ll, ihr Mittelpunkt bei x angegeben.

In dem sehr häufig vorkommenden Falle, wo man weiß, daß genaue optische Bilder auf der Netzhaut entworfen werden, und es nur darauf ankommt, den Ort des Bildes für einen bestimmten Punkt des Gegenstandes zu finden, genügt die Kenntnis der Knotenpunkte. Erlaubt man sich dabei die Vereinfachung, nur einen Knotenpunkt anzunehmen, so findet man den Ort des Bildes, wenn man von dem leuchtenden Punkte eine gerade Linie nach dem Knotenpunkte zieht, und diese bis zur Netzhaut verlängert; wo sie die Netzhaut trifft, ist der Ort des Bildes. Eine solche gerade Linie nennt man Richtungslinie des Sehens. Der einfach gedachte Knotenpunkt ist also der Kreuzungspunkt der Richtungslinien. Das vor der Hornhaut und das hinter der Linse liegende

Stück einer solchen Linie würde zugleich dem Wege eines gewissen Strahls angehören, den man Richtungsstrahl nennen kann. Nur zwischen der vorderen Hornhaut- und hinteren Linsenfläche fällt der Richtungsstrahl nicht notwendig mit der Richtungslinie zusammen.

Will man die genauere Konstruktion machen, wobei man beide Knotenpunkte als getrennt betrachtet, so hat man zwei Richtungslinien zu unterscheiden. Die erste geht vom leuchtenden Punkte zum ersten Knotenpunkte, und die zweite ist parallel mit der ersten durch den zweiten Knotenpunkt zu legen. Wo letztere die Netzhaut schneidet, ist der Ort des Bildes. Das außerhalb des Auges liegende Stück der ersten Richtungslinie und das im Glaskörper liegende Stück der zweiten gehören wieder dem Wege eines Lichtstrahls an, des Richtungsstrahls.

Ich nenne den Richtungsstrahl, welcher die Stelle des direkten Sehens trifft, die Gesichtslinie. Der vordere gerade Teil der Gesichtslinie geht also von dem fixierten Punkte des Gesichtsfeldes in der Richtung des ersten Knotenpunktes, der hintere gerade Teil von dem zweiten Knotenpunkte her nach der Netzhautgrube. Da man früher den gelben Fleck meist in dem hinteren Ende der optischen Achse des Auges gelegen glaubte, hielt man die Gesichtslinie auch für identisch mit der Augenachse, und nannte diese Linie auch wohl Sehachse, oder Gesichtsachse. Nach meinen Untersuchungen sind aber beide merklich voneinander unterschieden. Vor dem Auge liegt die Gesichtslinie nach innen und meist etwas nach oben von der Augenachse, die Netzhautgrube also nach außen und meist etwas nach unten von der Achse. Ich habe in Fig. 44 die Lage der Gesichtslinie $G_{,} G_{,,}$ im horizontalen Durchschnitte des Auges angegeben, sowie ich sie in einem gut gebildeten Auge im Verhältnis zur Augenachse $F_{,} F_{,,}$ liegen fand. Die obere Seite der Figur ist die Schläfenseite, die untere die Nasenseite.

Um die Brechung der Lichtstrahlen in den einzelnen Mitteln des Auges zu berechnen, teilen wir uns das optische System des Auges in zwei Teile, deren ersten die Hornhaut, deren zweiten die Kristallinse ausmacht, so daß das erste Mittel des ersten Systems Luft, das Mittel zwischen beiden Systemen, oder das letzte des ersten, das erste des zweiten Systems wässrige Feuchtigkeit, das letzte Mittel des zweiten Systems Glaskörper ist.

Wir beginnen mit der Hornhaut. Die Untersuchung der Brechung in dieser wird wesentlich vereinfacht durch den Umstand, daß die Hornhaut sehr *dünn ist, fast gleichgekrümmte Flächen hat, und ihr Brechungsvermögen nur wenig das der wässrigen Feuchtigkeit übertrifft. Ich habe* § 9 *bei den Gleichungen* 12), 12a), 12b) nachgewiesen, daß man an jeder brechenden Fläche eine unendlich dünne Schicht von beliebigem Brechungsvermögen und gleichgekrümmten Flächen einschieben könne, ohne die Brechung zu verändern. Man denke sich somit vor der Hornhaut eine unendlich dünne Schicht wässriger Feuchtigkeit ausgebreitet, wie sich denn sogar in Wahrheit dort eine ähnliche Schicht befindet, nämlich die Schicht der die Hornhaut netzenden Tränen. Dann können wir nachher die Hornhaut selbst als eine uhrglasförmige Linse betrachten, welche auf beiden Seiten von dem gleichen Medium, wässriger Feuchtigkeit, umgeben ist. Eine solche Linse hat eine sehr große oder unendliche Brennweite, d. h. sie verändert den Gang der Lichtstrahlen nicht merklich. Daraus folgt, daß die Brechung der Lichtstrahlen in der Hornhaut fast dieselbe sein wird, als wenn die wässrige Flüssigkeit bis an die vordere Fläche der Horn-

haut reichte. Diese Annahme ist daher bis jetzt auch fast immer bei der Berechnung des Ganges der Lichtstrahlen in der Hornhaut gemacht worden, und sie ist um so notwendiger zu machen, da wir bisher zwar gute Messungen der äußeren Hornhautkrümmung, aber keine genügend zuverlässigen für die innere besitzen.

Sollte die bezeichnete Annahme streng gerechtfertigt sein, so müßte nach § 9 Gleichung 13) sein

$$n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) d = 0 ,$$

wo n_1 das Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit, n_2 das der Hornhaut, d die Dicke, r_1 den Krümmungshalbmesser der vorderen, r_2 der hinteren Fläche der Hornhaut bezeichnet. Diese Gleichung kann nun in der Tat auf die Hornhaut nicht wohl passen. Wenn wir sie schreiben:

$$(r_2 + d) - r_1 = \frac{n_1}{n_2} d ,$$

so ist $(r_2 + d)$ der Abstand des Krümmungsmittelpunktes der hinteren Fläche vom Scheitel der vorderen, und die Gleichung würde aussagen, daß der Krümmungsmittelpunkt der hinteren Fläche hinter dem der vorderen liege. Dann müßte die Hornhaut von der Mitte nach dem Rande zu an Dicke abnehmen, während in der Regel das Umgekehrte der Fall ist. Die Hornhaut wird also den Folgerungen gemäß, welche am Ende des § 9 für konkavkonvexe Linsen aus der Gleichung 13) gezogen sind, in der Regel als Linse in wässriger Feuchtigkeit aufgehängt eine negative, aber sehr große Brennweite haben.

Nehmen wir $r_1 = 8$ mm, $r_2 = 7$ mm, $d = 1$ mm und nach W. Krause $n_2 = 1{,}3507$, $n_1 = 1{,}3420$, so wird nach § 9 Gleichung 13) die Brennweite der in wässriger Feuchtigkeit befindlichen Hornhaut gleich $-$ 8,7 Meter, eine Größe, welche wir im Verhältnisse zu den Dimensionen des Auges als unendlich groß betrachten können.

Dasselbe wurde bestätigt durch Versuche mit dem Ophthalmometer, mittels welches Instrumentes ich die Größe eines Objekts maß, welches sich hinter einem Glasgefäße mit parallelen Wänden befand. Brachte ich in das Wasser eine frische Hornhaut einer menschlichen Leiche, so daß ich das Objekt nur durch die Hornhaut erblickte, so war durch das Ophthalmometer keine Verkleinerung des Bildes zu entdecken. Diese war also so gering, daß die leichte Trübung des Bildes durch die eingeführte Hornhaut hinreichte, sie unwahrnehmbar zu machen.

Um berechnen oder schätzen zu können, um wieviel sich die wirkliche Brechung am Auge von derjenigen unterschiede, welche eintreten würde, wenn das Brechungsvermögen der Hornhaut wirklich dem der wässrigen Feuchtigkeit gleich wäre, wollen wir die optischen Konstanten der Hornhaut nach der Formel § 9 Nr. 12) bestimmen, und dabei setzen $n_1 = 1$, $n_3 = n$, $n_2 = n + \triangle n$, $r_1 = r$, $r_2 = r - \triangle r$, wobei wir die Größen $\triangle n$, $\triangle r$ und die Dicke der Hornhaut d als sehr klein gegen n und r ansehen können. Wenn wir diese Bezeichnungen in § 9 Gleichungen 12) einsetzen, und die höheren Dimensionen der kleinen Größen vernachlässigen, erhalten wir die Brennweiten.

$$F_1 = \frac{1}{n} F_2 = \frac{r}{n-1} \left\{ 1 - \triangle n \cdot \frac{(n-1)d - n \triangle r}{n(n-1)r} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1).$$

Der Unterschied der Brennweiten von dem Werte $\frac{r}{n-1}$, den wir durch die Annahme $\triangle n = 0$ erhalten, ist eine kleine Größe zweiter Dimension; ebenso die Entfernung x des ersten Hauptpunktes, von der vorderen Hornhautfläche nach vorn gerechnet,

$$x = \frac{d \cdot \triangle n}{n(n-1)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1\,a).$$

Die Entfernung der beiden Hauptpunkte voneinander a wird sogar eine kleine Größe dritter Dimension:

$$a = \frac{d^2 \triangle n}{n r} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1\,b).$$

Für die Berechnung der Bilder wird es daher genügen, nur eine Brechung an der vorderen Fläche der Hornhaut in Betracht zu ziehen, und dabei das Brechungsvermögen der Hornhaut gleich dem der wässrigen Feuchtigkeit zu setzen.

Der zweite Teil des optischen Systems des Auges besteht aus der Kristalllinse. Vor dieser befindet sich die wässrige, hinter ihr die Glasfeuchtigkeit. Da das Brechungsvermögen dieser beiden Stoffe nur äußerst geringe Unterschiede zeigt, so wollen wir diesen Unterschied vernachlässigen. In optischen Systemen, deren erstes und letztes Mittel identisch ist, fallen die Hauptpunkte mit den Knotenpunkten zusammen. Wir können also für die Kristallinse im Auge, wie bei den gewöhnlichen Glaslinsen unserer optischen Instrumente, beide Arten von Punkten identifizieren. Die Kristallinse unterscheidet sich aber dadurch wesentlich von unseren Glaslinsen, daß die Dichtigkeit ihrer Substanz nicht konstant ist, sondern von außen nach innen zunimmt. Da wir das Gesetz dieser Zunahme nicht genau kennen, sind wir auch außer Stande, den Gang der Lichtstrahlen durch die Linse vollständig zu berechnen, und den Ort ihrer Brennpunkte und Hauptpunkte genau zu bestimmen. Wir müssen uns begnügen, Grenzen für die Lage dieser Punkte zu finden. In dieser Beziehung lassen sich folgende Sätze aufstellen.

1. Die Brennweiten der Kristallinse sind kleiner, als sie sein würden, wenn ihre ganze Masse das Brechungsvermögen ihres Kerns hätte.

Um diesen wichtigen Satz zu beweisen, denken wir uns die Kristallinse nach ihrer natürlichen Schichtung zerlegt in den Kern, der eine fast kugelige bikonvexe Linse von positiver Brennweite darstellt, und in die einzelnen ihn umschließenden Schichten, deren zunächst der Augenachse gelegene Teile konkavkonvexen Linsen entsprechen. Und zwar sind dies Linsen, die nach dem Rande zu dicker oder wenigstens nicht dünner werden, bei denen also $r_1 \geqq r_2 + d$ (s. Ende von § 9), wenn wir mit r_1 den Radius der konvexen, mit r_2 den der konkaven Fläche, und mit d die Dicke der Linse bezeichnen. Nach § 9 Gleichung 13) ist unter diesen Umständen die Brennweite negativ. Die Lage der Hauptpunkte h_1 und h_2 und Brennpunkte p_1 und p_2 solcher Linsen ist dargestellt in § 9 Fig. 42.

Es seien in Fig. 45 $a_{,}$ und $a_{,,}$ die Scheitelpunkte, $c_{,}$ und $c_{,,}$ die Mittelpunkte der beiden Grenzflächen, $h_{,}$ und $h_{,,}$ die Hauptpunkte einer solchen Linse. Von einem Objekte b, vor der ersten (konvexen) Fläche befindlich, entwirft die Linse ein verkleinertes aufrechtes virtuelles Bild, wie in § 9 gezeigt

ist, und, können wir hier hinzusetzen, dies Bild β liegt nicht nur vor dem zweiten Hauptpunkte, sondern auch stets vor der zweiten Linsenfläche. Denn wenn das Objekt b von $h_,$ weiter entfernt ist als der Scheitel der ersten brechenden Fläche $a_,$, so muß sein Bild weiter von $h_{,,}$ entfernt sein als α, das Bild von $a_,$. Das Bild von $a_,$ wird aber nur durch eine Brechung an der Hinterfläche der Linse entworfen, und da die Brennweite dieser Fläche negativ ist, wird das Bild α von $a_,$ ihr näher und vor der Fläche liegen. Daher muß β, welches noch vor α liegt, jedenfalls vor der Hinterfläche der Linse liegen.

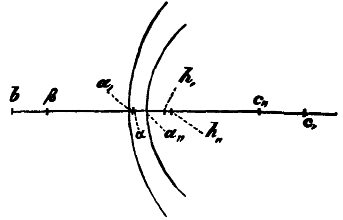


Fig. 45.

Es läßt sich ferner zeigen, daß das Bild β eines vor $a_,$ liegenden Objekts b der hinteren Fläche der Linse desto näher rückt, je größer das Brechungsvermögen der Linse. Zunächst ergibt sich leicht, daß das Bild α von $a_,$ der hinteren Fläche der Linse desto näher rückt, je stärker das Brechungsvermögen. Wenn α das Bild von $a_,$ ist, und wir die Entfernung $\alpha a_{,,}$ mit q bezeichnen, so haben wir nach den Gleichungen § 9 Nr. 3

$$\frac{n_2}{d} - \frac{n_1}{q} = \frac{n_1 - n_2}{r_2}$$

oder

$$q = \frac{n_1 r_2 d}{n_2 r_2 + (n_2 - n_1) d}.$$

Da der Nenner des Wertes von q größer wird, wenn n_2 größer wird, so wird q kleiner.

Wenn nun gezeigt werden kann, daß, wenn n_2 größer wird, auch das Bild von b näher an α rückt, so folgt dann, daß unter dieser Bedingung das Bild von b sich auch der zweiten Fläche der Linse nähert.

Um dies zu zeigen, bezeichnen wir die Entfernung des Objekts b vom ersten Hauptpunkte, also die Linie $b h_,$, mit $f_,$, die des Punktes $a_,$ von demselben Hauptpunkte, also die Linie $a_, h_,$, welche in den Gleichungen (13a) des § 9 der Länge $-h_,$ entspricht, mit p, die Brennweite der Linse mit F, so ist die Entfernung des Bildes β vom zweiten Hauptpunkte, oder die Länge

$$\beta h_2 = \frac{f_, F}{F - f_,}$$

und die Entfernung des Bildes α des Punktes $a_,$ von demselben Hauptpunkte

$$\alpha h_2 = \frac{p F}{F - p}.$$

Die zweite Gleichung von der ersten subtrahiert, gibt die gesuchte Entfernung der beiden Bilder voneinander:

$$\beta \alpha = \frac{(f_, - p) F^2}{(F - f_,)(F - p)}$$

$$= \frac{f_, - p}{\left[\frac{F - p}{F} - \frac{f_, - p}{F}\right] \frac{F - p}{F}}.$$

Wenn wir n_2 verändern, bleibt in diesem Ausdrucke $f_, - p$ unverändert. Setzen wir

$$C = \frac{F - p}{F}$$

und hierin für F und $p = -h_,$ aus den Gleichungen 13) und 13a) § 9 ihre Werte, so erhalten wir

$$C = 1 + \left(1 - \frac{n_1}{n_2}\right)\frac{d}{r_2}.$$

Setzen wir ferner den absoluten Wert des in unserem Falle negativen F gleich P, also nach § 9 13)

$$P = -F = \frac{n_1 r_1 r_2}{\left(1 - \frac{n_1}{n_2}\right)[n_2(r_1 - r_2 - d) + n_1 d]},$$

so wird

$$\beta\alpha = \frac{(f_, - p)}{\left[C + \frac{f_, - p}{P}\right] C}.$$

Wenn wir nun n_2 größer machen, wird C größer, P kleiner, wie sich aus der Form, in der wir ihre Werte geschrieben haben, leicht ergibt, und $f_, - p$ bleibt ungeändert. Wenn C größer wird, wird $\beta\alpha$ kleiner, und wenn P kleiner wird, wird $\beta\alpha$ ebenfalls kleiner. Folglich wird $\beta\alpha$ kleiner, und endlich auch $\beta a_{,,}$ kleiner, wenn n_2 größer wird.

Wir haben bisher die Eigenschaft einer einzelnen solchen Linse untersucht, wie sie durch Zerlegung des Kristallkörpers nach seinen Schichten entstehen würden. Denken wir uns nun alle die konkavkonvexen Linsen, welche auf einer Seite des Kerns im Kristallkörper liegen, in wässrige Feuchtigkeit getaucht, und wieder in ihre natürliche Lage gebracht, oder denken wir uns, mit anderen Worten, zwischen jede zwei Lagen ungleicher Dichtigkeit im Kristallkörper eine unendlich dünne Schicht wässriger Feuchtigkeit eingeschaltet, und den Teil derselben isoliert, welcher auf einer Seite des Kerns liegt, so erhalten wir ein optisches System, welches wir eine zusammengesetzte konvexkonkave Linse nennen können.

Es sei dies System in Fig. 46 dargestellt; ab sei die Achse, g der Scheitel der äußersten konvexen, h der konkaven Fläche des Systems. Vor der konvexen Seite des Systems liege ein leuchtender Punkt a. Nach dem, was wir in bezug auf eine einzelne solche Linse bewiesen haben, folgt, daß die erste Linse ein Bild von a entwirft, welches vor ihrer zweiten Fläche, also auch vor der ersten Fläche der zweiten Linse liegt. Daraus folgt weiter, daß auch diese Linse und so jede folgende ein Bild von a entwirft, welches vor ihrer zweiten Fläche liegt. Das ganze System wird also ein Bild von a entwerfen, welches vor seiner brechenden Fläche liegt, etwa in α.

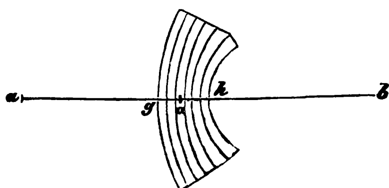


Fig. 46.

Ferner ergibt sich leicht, daß, wenn a näher nach g rückt, auch α sich dem Punkte h nähern muß. Denn einfache Linsen mit negativer Brennweite

entwerfen von näheren reellen Objekten, welche vor ihnen liegen, auch nähere Bilder. Nähert sich also *a* der ersten Linse, so entwirft diese auch ein näheres Bild, welches wieder Objekt der zweiten Linse wird, und so fort.

Endlich ergibt sich, daß, wenn wir das Brechungsvermögen einer der Schichten erhöhen, das Bild *α* näher an *h* fallen wird. Bis zu der veränderten Schicht hin bleibt der Gang der Lichtstrahlen und die Lage der Bilder unverändert, die Schicht mit erhöhtem Brechungsvermögen entwirft aber jetzt ein näheres Bild von *a*, welches ein näheres Objekt für die folgenden Schichten wird, und dem ein näher an *h* gelegenes letztes Bild *α* entsprechen muß.

Wenn also das Bild *α* dieselbe Lage behalten soll, während wir das Brechungsvermögen einer der Schichten erhöhen, müssen wir die Entfernung *ag* entsprechend vergrößern.

Die ganze Kristallinse können wir nun zusammengesetzt denken aus zwei solchen Systemen konkavkonvexer Linsen *B* und *C* und ihrem bikonvexen Kerne *A*, wie in Fig. 47. Wenn die Kristallinse als Ganzes von einem vor ihr gelegenen Punkte *a* ein reelles umgekehrtes Bild in *b* entwirft, so wird das Schichtensystem *B* ein Bild *α* vor der vorderen Fläche des Kerns entwerfen müssen, und dem Bilde *b* wird ebenso ein Bild *β* hinter der hinteren Fläche des Kerns entsprechen müssen, welches die Strahlen nach der Brechung im Kerne und vor der Brechung im Systeme *C* bilden. Der Kern muß also nach Art von bikonvexen Linsen ein umgekehrtes Bildchen von *α* in *β* entwerfen. Er tut dies, wenn *α* vor seinem vorderen Brennpunkte liegt.

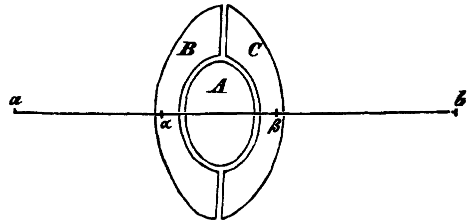


Fig. 47.

Rückt *a* in unendliche Entfernung, so wird *b* im hinteren Brennpunkte der ganzen Kristallinse liegen müssen.

Erhöhen wir nun das Brechungsvermögen einer der Schichten in *B*, so wird *α* näher an die Vorderfläche von *A* rücken, folglich das Bild *β*, welches *A* von *α*, und das Bild *b*, welches *C* von *β* entwirft, sich nach hinten entfernen.

Erhöhen wir ebenso das Brechungsvermögen einer der Schichten von *C*, so wird dem Bilde *β*, welches seinen Platz behält, ein entfernteres Bild *b* entsprechen.

Erhöhen wir also das Brechungsvermögen einzelner Schichten der Systeme *B* und *C*, so entfernt sich der hintere Brennpunkt der Kristallinse von ihrer hinteren Fläche.

Wir können das Brechungsvermögen sämtlicher Schichten der Krystallinse bis zu dem des Kerns wachsen lassen, ohne daß der Brennpunkt in unendliche Entfernung hinausrückt, da ja schließlich, wenn die Beschaffenheit aller Schichten der des Kerns gleich geworden ist, die Kristallinse eine einfache homogene bikonvexe Linse darstellt, deren Brennweite positiv und endlich sein muß.

Was für den hinteren Brennpunkt der Linse gilt, gilt natürlich auch für den vorderen, und somit ist bewiesen, daß die Brennpunkte der Kristallinse ihr näher liegen, als sie es tun würden, wenn alle ihre Schichten die Dichtigkeit und das Brechungsvermögen des Kerns hätten.

2. Die Entfernung der Hauptpunkte voneinander ist in der Kristallinse kleiner als in einer Linse, welche dieselbe Form und das Brechungsvermögen des Kerns hätte.

Die Hauptpunkte sind die von der Linse selbst entworfenen Bilder eines in ihr liegenden Punktes, nämlich ihres sogenannten optischen Mittelpunktes. Wo dieser auch liegen mag, so läßt sich in ganz ähnlicher Weise, wie es eben zur Bestimmung der Brennpunkte geschehen ist, nachweisen, daß die Bilder des optischen Mittelpunktes desto näher den Oberflächen der Linse rücken werden, je mehr das Brechungsvermögen der einzelnen Schichten der Kristalllinse steigt, daß dabei also auch die Entfernung der beiden Bilder voneinander algebraisch größer wird. Wenn nun sämtliche Schichten der Linse schließlich das Brechungsvermögen des Kerns erreicht haben, wird im allgemeinen der optische Mittelpunkt der Kristallinse nicht mehr mit dem optischen Mittelpunkte dieser neuen gleichartigen Linse zusammenfallen. Da aber bei einer Linse mit positiven Brennweiten die Entfernung der Hauptpunkte ein Maximum ist unter den Entfernungen zusammengehöriger Bilder, so ist die Entfernung der Hauptpunkte dieser neuen gleichartigen Linse jedenfalls größer als die Entfernung der von ihr entworfenen Bilder des optischen Mittelpunktes der unveränderten Kristallinse, folglich auch größer als die Entfernung der Hauptpunkte der unveränderten Kristallinse voneinander.

Es läßt sich ferner nachweisen, daß die Entfernung der Hauptpunkte der Kristallinse einen positiven Wert hat, d. h. daß der zweite Hauptpunkt hinter dem ersten liegt, wenn wir annehmen, wie dies aus der Form der Linsenschichten hervorzugehen scheint, daß die Krümmungsradien der in der Achse gelegenen Teile der Schichtflächen größer sind als die Entfernungen dieser Flächen vom Kerne der Linse. Brechende Kugelflächen entwerfen von Punkten, welche zwischen ihnen und ihrem Mittelpunkte liegen, Bilder, die der brechenden Fläche näher sind als das Objekt. Folglich wird das Bild des Mittelpunktes des Linsenkerns, welches die vordere Linsenhälfte entwirft, vor seinem Objekte, das, welches die hintere Linsenfläche entwirft, hinter seinem Objekte liegen. Die beiden zusammengehörigen Bilder des Mittelpunktes des Linsenkerns haben also eine positive Entfernung. Da der Abstand der Hauptpunkte algebraisch größer ist als der aller anderen zusammengehörigen Bilder, so ist dieser Abstand jedenfalls positiv.

Die Hauptpunkte einer Linse, welche die Gestalt der menschlichen Kristalllinse und das Brechungsvermögen ihres Kerns hätte, würden nur etwa $^1/_4$ mm voneinander entfernt sein; dadurch ist die Entfernung der Hauptpunkte der Kristallinse voneinander also in sehr enge Grenzen eingeschlossen.

Die Brechungsverhältnisse der durchsichtigen Mittel des menschlichen Auges sind früher von Chossat[1] und Brewster[2] bestimmt worden; neuerdings ist eine große Zahl solcher Messungen von W. Krause[3] ausgeführt worden, während die erstgenannten Beobachter, wie es scheint, nur wenige Augen untersucht haben. Brewster brachte die zu untersuchende Substanz zwischen die krumme Fläche einer Konvexlinse, welche als Objektiv eines Mikroskops diente, und ein gegen die Achse des Mikroskops senkrecht gestelltes Planglas. Dadurch wird die Brennweite des Mikroskops verändert. Brewster maß den Objektabstand des Mikroskops vor und nach der Einbringung der brechenden Substanz und nach der Einbringung von reinem Wasser, dessen Brechungs-

---

[1] *Bulletin des sc. par la Société philom. de Paris.* A. 1818. Juin. p. 294.

[2] *Edinburgh Philos. Journal.* 1819. Nr. 1. p. 47.

[3] Die Brechungsindices der durchsichtigen Medien des menschl. Auges von Dr. W. Krause. Hannover 1855.

koeffizient bekannt war. CAHOURS und BECQUEREL[1] schlugen vor, die Größe der Bilder des Mikroskops zu messen, und dieser Methode ist auch W. KRAUSE gefolgt. Ich lasse hier die Beschreibung des Verfahrens folgen, welches der letztere angewendet hat.

Ein gewöhnliches KELLNERsches Mikroskop, dessen unterer Teil in Fig. 48 abgebildet ist, wurde für die Messungen auf folgende Art eingerichtet. An die Stelle des Objektivs wurde eine bikonvexe Linse von Crownglas von etwa 30 mm Brennweite gebracht, indem die Fassung b in das Rohr des Mikroskops a eingeschraubt wurde. Die Linse befand sich in einer konkaven, geschwärzten Vertiefung, und wurde darin durch die Hülse d, die in der Mitte mit einer Öffnung von 2,6 mm Durchmesser versehen war, festgeschraubt. Die Linse lag luftdicht auf dem Rande dieser Öffnung an. Unter ihr wurde eine plane Glasplatte e, ebenfalls von Crownglas, angebracht, vermittelst eines Ringes f, dessen Innenraum konisch ausgeschliffen war und auf die Hülse d, die ebenfalls konisch zugeschliffen war, paßte, jedoch nicht so genau, daß nicht Luft langsam dazwischen hindurchdringen konnte.

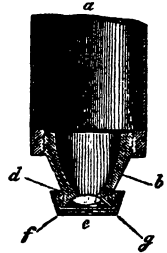


Fig. 48.

Das zu prüfende Augenmedium wurde in den Ring f auf die Mitte der ebenen Platte gebracht, und dann der Ring so fest auf die Hülse d aufgedrückt, daß die letztere auf den vorspringenden Rand g aufstieß, um dadurch das Planglas sicher vertikal gegen die Achse des Mikroskops zu stellen. Nach jeder Messung konnte die Objektivlinse herausgenommen und gereinigt werden.

Im Okulare des Mikroskops war ein Glasmikrometer, geteilt in $^1/_{30}$ Wiener Linien, befestigt; auf den Objekttisch wurde ein ebensolches, geteilt in $^1/_{10}$ Linien, gelegt, und das Mikroskop so gestellt, daß beide Teilungen gleichzeitig deutlich gesehen wurden, und bestimmt, wieviel Teilstrischen des oberen Mikrometers einer des unteren entsprach. Ebensolche Messungen wurden angestellt, wenn bloß Luft zwischen der Objektivlinse und der ebenen Platte, und wenn destilliertes Wasser dazwischen war.

Zur Berechnung der Resultate können wir die Gleichungen § 9 Nr. 12) benutzen; zwar beziehen sich diese nur auf zwei brechende Flächen, und in dem Objektivsystem von KRAUSES Apparat haben wir vier, nämlich die erste und zweite Fläche des Planglases, die erste und zweite Fläche der bikonvexen Linse. Wenn wir uns aber das System in zwei zerlegen, von denen das erste die beiden ebenen Flächen umfaßt, das zweite die beiden Flächen der Linse, so sind die Brennweiten des ersten Systems unendlich. Bezeichnen wir die erste (untere) Brennweite des Planglases entsprechend der Bezeichnung in § 9 Gleichung (11a) bis (f) mit $f_{,}$, die zweite des Planglases mit $f_{,,}$, die erste (untere) der Linse mit $\varphi_{,}$, die zweite mit $\varphi_{,,}$, den Abstand des zweiten Hauptpunkts des Planglases vom ersten der Linse mit d, so gibt die letzte der Gleichungen (11f), wenn wir $f_{,,}$ unendlich groß setzen, für die zweite (obere) Brennweite des ganzen Systems:

$$F_{,,} = \varphi_{,,}.$$

Die erste Brennweite des ganzen Systems ist dieser gleich, da das erste und letzte Mittel (Luft) identisch sind.

Für die Entfernung des zweiten Hauptpunktes des ganzen Systems vom zweiten Hauptpunkte der Linse gibt die Gleichung (11e) den Wert 0, wenn wir $f_{,,} = \infty$ setzen. Der zweite Hauptpunkt und zweite Brennpunkt sind also in diesem Falle dieselben, als wenn das zwischen der ebenen Platte und der Linse eingeschlossene Mittel nach vorn unbegrenzt wären.

Wir nennen also, entsprechend der Bezeichnung des § 9 Gleichung 12), das Brechungsverhältnis der zu prüfenden Substanz n_1, das der Glaslinse n_2; das der Luft n_3 können wir $= 1$ setzen; dann entspricht der Wert von F_2 der genannten Gleichungen der Brennweite F unseres Objektivsystems:

[1] *L'Institut. Scienc. math., phys. et natur.* 1840. p. 399.

$$F = \frac{n_2 r_1 r_2}{n_2(1-n_2)r_1 + [n_2 r_2 - (1-n_2)d](n_2 - n_1)} .$$

Nennen wir F_0 die Brennweite des Objektivsystems für den Fall, daß destilliertes Wasser zwischen die Platte und Linse eingebracht ist, n_0 das Brechungsvermögen des destillierten Wassers, und Φ die Brennweite für den Fall, wo sich Luft zwischen der Platte und Linse befindet, so erhalten wir noch zwei ähnliche Gleichungen, welche wir mit der vorigen in folgender Form schreiben können:

$$\left.\begin{aligned} FA - n_2 r_1 r_2 &= n_1 FB \\ F_0 A - n_2 r_1 r_2 &= n_0 F_0 B \\ \Phi A - n_2 r_1 r_2 &= \Phi B \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2),$$

wenn wir der Abkürzung wegen setzen:

$$A = n_2[(1-n_2)r_1 + n_2 r_2 - (1-n_2)d]$$
$$B = n_2 r_2 - (1-n_2)d.$$

Wenn wir die zweite der Gleichungen 2) von der ersten, und die dritte von der zweiten abziehen, erhalten wir:

$$(F - F_0)A = (n_1 F - n_0 F_0)B$$
$$(F_0 - \Phi)A = (n_0 F_0 - \Phi)B.$$

Diese beiden Gleichungen durcheinander dividiert geben:

$$\frac{F - F_0}{F_0 - \Phi} = \frac{n_1 F - n_0 F_0}{n_0 F_0 - \Phi} .$$

Daraus folgt endlich:

$$n_1 = 1 + (n_0 - 1)\frac{F_0(F - \Phi)}{F(F_0 - \Phi)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2a).$$

Wir können also das Brechungsverhältnis der zu prüfenden Substanz n_1 berechnen, wenn wir das Brechungsverhältnis des destillierten Wassers n_0 kennen und die drei Brennweiten des Objektivsystems F, F_0 und Φ. Diese Brennweiten lassen sich aber aus der Messung der Bilder berechnen. Ist b die Größe eines Teilstrichs des unteren Mikrometers, und β die absolute Größe seines in der Okularblendung des Mikroskops entworfenen Bildes, ohne Rücksicht auf seine umgekehrte Stellung, F die Brennweite des Objektivsystems und f_2 die Entfernung des Bildes β vom zweiten Hauptpunkte des Objektivsystems, so ist nach § 9 Gleichung 8b):

$$\frac{\beta}{b} = \frac{f_2 - F}{F}$$

oder

$$F = \frac{f_2 b}{b + \beta} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2b).$$

Wenn man b und β gemessen hat, würde man also f_2 noch kennen müssen, um F zu finden. Vorausgesetzt aber, daß f_2 in allen Fällen dasselbe bleibt, was in Krauses Apparat mit großer Annäherung der Fall ist, würde sich dessen Wert aus der Gleichung für n_1 fortheben, braucht also dann nicht gekannt zu sein. Lassen wir den drei Brennweiten F, F_0 und Φ entsprechen die drei Werte β, β_0 und $\mathfrak{b}$, so wird der Wert von n_1

$$n_1 = 1 + (n_0 - 1)\frac{\mathfrak{b} - \beta}{\mathfrak{b} - \beta_0} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2c).$$

Zur Berechnung von n_1 braucht man also unter diesen Umständen nicht einmal die Größe des Objekts b zu kennen, welches man unter das Mikroskop gelegt hat, sondern es genügt, irgend ein beliebiges Objekt zu nehmen, wenn es nur immer dasselbe bleibt.

Der Wert von f_2 ist in diesen Messungen konstant, wenn sich die Stellung des Mikrometers im Okulare, und die des zweiten Hauptpunktes des Objektivsystems nicht ändert. Die letztere ist bei Einschaltung verschiedener Flüssigkeiten zwischen der ebenen Platte und Linse nur dann streng konstant, wenn die obere Fläche der Linse eben ist. In § 9 Gleichung 12a) ist h_2 die Entfernung des zweiten Hauptpunktes von der hinteren Fläche der Linse. Wenn r_2 nicht unendlich ist, ist diese Entfernung von n_1, dem Brechungsvermögen der eingeschalteten Substanz, abhängig. Wenn man r_2 unendlich groß setzt, nachdem man Zähler und Nenner des Ausdrucks für h_2 dadurch dividiert hat, wird

$$h_2 = -\frac{n_3 d}{n_2},$$

also unabhängig von n_1. Es möchte daher besser sein, bei solchen Messungen statt der bikonvexen eine plankonvexe Linse zu nehmen, die plane Seite nach oben gewendet. Indessen ist der Fehler, welcher durch Anwendung einer bikonvexen entstehen kann, jedenfalls äußerst unbedeutend, wenn nur die Dicke der Linse gegen die Länge des Körpers des Mikroskops vernachlässigt werden kann.

Brewster hat bei seinen Messungen den Brechungskoeffizienten des destillierten Wassers = 1,3358 gesetzt, was nach Fraunhofers Messungen etwa der Linie E im Grün, also den Strahlen mittlerer Brechbarkeit entsprechen würde. Krause zieht auf Listings Rat vor, als Grundlage den intensivsten Strahl des Spektrums zu nehmen, welcher nach Fraunhofer den Brechungsindex 1,33424 hat. Ich gebe in der folgenden Tafel die Resultate, welche Chossat, Brewster und Krause für das menschliche Auge erhalten haben. W. Krause hat 20 Augen von 10 Individuen untersucht und sehr beträchtliche individuelle Abweichungen gefunden.

Tabelle der Brechungsindizes menschlicher Augen.

Beobachter		Hornhaut	Wässerige Feuchtigkeit	Glaskörper	Kristallinse: Äußere Schicht	Kristallinse: Mittlere Schicht	Kristallinse: Kern
Chossat		1,33	1,338	1,339	1,338	1,395	1,420
Brewster $n_0 = 1,3358$			1,3366	1,3394	1,3767	1,3786	1,3839
W. Krause $n_0 = 1,3342$	Max.	1,3569	1,3557	1,3569	1,4743	1,4775	1,4807
	Min.	1,3431	1,3349	1,3361	1,3431	1,3523	1,4252
	Mittel	1,3507	1,3420	1,3485	1,4053	1,4294	1,4541
Helmholtz $n_0 = 1,3354$			1,3365	1,3382	1,4189		

Die von mir selbst angestellten Messungen sind in folgender Weise ausgeführt: Es wurden Proben der zu untersuchenden Flüssigkeit zwischen einer ebenen Glasplatte und der konkaven Fläche einer kleinen plankonkaven Linse eingeschlossen; Bilder dieses optischen Systems wurden mit dem Ophthalmometer gemessen, daraus die Brennweiten berechnet. Außerdem konnte der Radius der konkaven Linsenfläche direkt mit dem Ophthalmometer bestimmt werden, ähnlich wie dies in § 2 für den Krümmungsradius der Hornhaut geschehen ist. Unter diesen Umständen war es nicht nötig, auch mit destilliertem Wasser zwischen den Gläsern zu beobachten, und dessen

Brechungsverhältnis als bekannt vorauszusetzen. Das Brechungsverhältnis des destillierten Wassers fand sich auf diese Weise 1,3351, was zwischen BREWSTERs und KRAUSEs Zahl liegt.

KRAUSE hat noch eine Reihe von Brechungsverhältnissen an Kalbsaugen untersucht. namentlich in der Absicht, um zu ermitteln, ob die Brechungsverhältnisse in den ersten 24 Stunden nach dem Tode sich merklich verändern, indem er 20 solcher Augen unmittelbar nach dem Tode untersuchte, 20 andere, nachdem sie 24 Stunden bei 15° R. aufbewahrt worden waren. Er fand folgende Mittelzahlen:

	frische Augen	nach 24 Stunden
Hornhaut	1.3467	1.3480
Wässrige Feuchtigkeit	1.3421	1.3415
Glaskörper	1.3529	1.3528
Äußere Linsenschicht	1.3983	1.4013
Mittlere Linsenschicht	1.4194	1.4211
Linsenkern	1.4520	1.4512

Daraus geht hervor, daß sich die Brechungsverhältnisse der Kalbsaugen in den ersten 24 Stunden nach dem Tode nicht merklich verändern, und es läßt sich demnach dasselbe für die menschlichen annehmen.

Da aus der Gestalt und den Brechungsverhältnissen der einzelnen Schichten der Kristallinse deren Brennweite nicht unmittelbar zu berechnen ist, so will ich hier die Resultate von direkten Messungen der optischen Konstanten zweier menschlichen Linsen anführen, welche ich etwa 12 Stunden nach dem Tode untersuchen konnte.

An der Luft trocknet und faltet sich die Oberfläche einer aus dem Auge genommenen Linse sehr bald, in Wasser quillt sie auf und wird trübe. Ich habe deshalb die toten Linsen während ihrer Untersuchung mit Glasfeuchtigkeit umgeben. Außerdem sind die Linsen außerordentlich nachgiebig gegen jeden Zug und Druck; so lange sie aber von ihrer elastischen und sie sehr prall umschließenden Kapsel umgeben sind, sind diese Formveränderungen vorübergehend. Man muß die Linsen während der Untersuchung also so lagern, daß sie keinem äußeren Zuge oder Drucke ausgesetzt sind. Ich tat das auf folgende Weise. In Fig. 49 ist ein Durchschnitt des kleinen Apparates. den ich dazu brauchte. in natürlicher Größe dargestellt. In der Mitte befindet sich ein hohles zylindrisches Stück aus Messing, welches im Inneren bei $b\,b$ eine horizontale. auf der oberen Seite konkave und in der Mitte mit einer runden Öffnung versehene Scheidewand hat. Ich benutzte dazu die Fassung eines der Objektivgläser eines älteren Mikroskops. Der untere Rand dieses Messingstücks wird auf die planparallele Glasplatte $c\,c$ aufgekittet. aber so. daß sich keine Schicht Kitt von merklicher Dicke zwischen die unterste Rundung des Randes und die Glasplatte einschiebt. Nun füllt man erst den unteren Hohlraum des Messingzylinders mit Glasfeuchtigkeit, legt dann die Kristallinse, welche man vorsichtig und ohne Verletzung oder harte Berührung aus dem Auge genommen hat, mit ihrer platteren Seite auf das Diaphragma $b\,b$. Dann füllt man oben noch etwas Glasfeuchtigkeit nach, bis sie bis zum oberen Rande des Messinggefäßes steht, und deckt die zweite planparallele Glasplatte $d\,d$ darüber, so daß diese auch oben der Glasfeuchtigkeit eine gerade Oberfläche gibt. Da ich mein Ophthalmometer nicht bequem vertikal stellen konnte. so setzte ich auf die Glasplatte $d\,d$ noch ein rechtwinkeliges, gleichschenkeliges Glasprisma f, welches das von unten her durch die Linse kommende Licht horizontal reflektierte. Das Ganze setzt man dann bequem auf den Körper eines Mikroskops. von dem man alle Gläser und die enge Blendung am unteren Teile entfernt hat. und

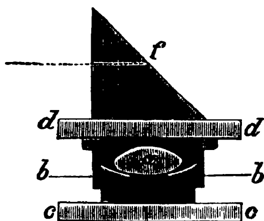


Fig. 49.

bringt eine Messinglatte mit GRAVESANDschen Schneiden, deren Zwischenraum als optisches Objekt für die Kristallinse gebraucht werden soll, einmal auf den Objekttisch des Mikroskops, und dann wieder dicht unter die Glasplatte *c c*. zwischen sie und den oberen Rand des Körpers des Mikroskops. Zur Beleuchtung gebraucht man den Spiegel des Mikroskops. indem man ihn von unten her Licht durch den zwischen den Schneiden gelegenen Ausschnitt der Messingplatte werfen läßt. Mittels des Ophthalmometers mißt man nun die Größe des Bildes. welches die Kristallinse von dem Ausschnitte der Messingplatte entwirft.

Zur Rechnung muß man die Entfernung des Ausschnitts zwischen den GRAVESANDschen Schneiden von der unteren Fläche der Platte *c c* kennen. Diese Größe sei a_1. wenn der Schirm auf dem Tische des Mikroskops liegt, und a_2, wenn er dicht unter der Platte liegt. Je größer man a_1 und je kleiner man a_2 machen kann, desto bessere Resultate gibt der Versuch. Ferner muß man die Dicke der Platte *c c* kennen, welche wir c nennen wollen, und wenigstens annähernd ihr Brechungsvermögen n_c, endlich die Entfernung b zwischen der oberen Fläche der Platte *c c* und dem oberen Rande der Öffnung *b b*, und das Brechungsverhältnis des Glaskörpers gegen Luft n_2. Ferner sei b_1 die Entfernung der GRAVESANDschen Schneiden voneinander zu der Zeit, wo sie auf dem Tische des Mikroskops um a_1 entfernt von der Platte c lagen, β_1 die Breite des von der Kristallinse entworfenen Bildes, ihres Zwischenraums. welche in diesem Falle eine negative Größe ist wegen der Umkehrung des Bildes, b_2 und β_2 die entsprechenden Größen bei der anderen Lage des Schirms. f die gesuchte Brennweite der Linse in Glasfeuchtigkeit, und x der Abstand ihres ersten Knotenpunktes von der Ebene des oberen Randes der Öffnung *b b*. So ergibt sich aus dem, was über die Brechung in ebenen Platten § 9 Gleichung 3e) und 6c) gefunden ist, daß die Lichtstrahlen, wenn sie in der Glasfeuchtigkeit vor der Kristallinse angekommen sind, einem Bilde von der Größe b_1 oder b_2 entsprechen, welches in der Entfernung beziehlich $\left(n a_1 + \frac{n}{n_c} c + b + x\right)$ oder $\left(n a_2 + \frac{n}{n_c} c + b + x\right)$ liegt. Die Größe des Bildes β_1 oder β_2 wird nachher durch die Brechung an den ebenen Flächen der oberen Glasplatte nicht weiter verändert. Wir haben also die Gleichungen:

$$\frac{\beta_1 - b_1}{\beta_1} = \frac{n a_1 + \frac{n}{n_c} c + b + x}{f}$$

$$\frac{\beta_2 - b_2}{\beta_2} = \frac{n a_2 + \frac{n}{n_c} c + b + x}{f}.$$

Durch Subtraktion erhält man:

$$\frac{\beta_1 - b_1}{\beta_1} - \frac{\beta_2 - b_2}{\beta_2} = \frac{n(a_1 - a_2)}{f},$$

woraus f zu finden ist:

$$f = \frac{n \beta_1 \beta_2 (a_1 - a_2)}{b_2 \beta_1 - b_1 \beta_2}.$$

und dann erhält man aus einer der beiden früheren Gleichungen auch x. Man vergesse bei der Rechnung nicht, daß β_1. wenn a_1 größer als die Brennweite ist, ein umgekehrtes Bild. also negativ ist. Die Größe x ist nicht unmittelbar gleich dem Abstande des Knotenpunktes von der vorderen Fläche der Linse zu setzen. sondern bedarf dazu noch einer kleinen Korrektion. weil die gekrümmte Fläche der Linse sich etwas unter die Ebene der Öffnung. auf deren Rändern sie ruht. herabwölbt. Wenn man den Durchmesser der Öffnung und den Krümmungsradius der Linse kennt, ist die Höhe des betreffenden Kugelabschnitts leicht zu berechnen.

Den Abstand des zweiten Knotenpunktes von der hinteren Fläche der Linse erhält man in derselben Weise, nachdem man die Linse umgekehrt hat.

Die kleine Größe $\frac{c}{n_c}$ kann man durch Beobachtungen mit dem Ophthalmometer bestimmen, indem man die Glasplatte *cc*, ähnlich wie sie hier zwischen dem Spalt und der Kristallinse angebracht ist, zwischen diesen und eine kleine Glaslinse von bekannter Brennweite und bekannter Lage der Knotenpunkte bringt. In ähnlicher Weise kann auch die Größe b ermittelt werden. Dieselben Gleichungen, welche wir für die Ermittelung von x und f aufgestellt haben, können bei bekanntem x und f auch dienen, b oder $\frac{c}{n_c}$ zu ermitteln.

Die Krümmungshalbmesser für die Scheitel der Linse können entweder, wie oben angegeben ist, durch Spiegelung ermittelt werden, oder auch durch Brechung. Zu dem Ende läßt man die Linse in ihrem Messinggehäuse liegen, und entfernt nur den Teil der Glasfeuchtigkeit, welcher ihre obere Fläche bedeckt, und stellt nun entweder den Ausschnitt zwischen den GRAVESANDschen Schneiden vor dem Prisma f, etwas seitlich von der Gesichtslinie des Ophthalmometers auf, und mißt die Größe seines Spiegelbildes, oder man läßt den Messingschirm mit den Schneiden auf dem Objekttische des Mikroskops liegen, und mißt das dioptrische Bild, welches jetzt entworfen wird. Wie die Messung des Spiegelbildchens zur Rechnung zu benutzen ist, ist schon oben angegeben. Für die dioptrische Messung mögen b_1, β_1 und f die bisherige Bedeutung behalten, β_3 die Größe des Bildes bezeichnen, nachdem man die gläserne Feuchtigkeit von der oberen Fläche der Linse entfernt hat, und y der Abstand des oberen Knotenpunktes von der oberen Fläche sein. (Dieser Abstand bezieht sich immer auf den Fall, wo die Linse in Glasfeuchtigkeit liegt.) Endlich sei R der Krümmungsradius im Scheitel der oberen Fläche. Dann kann R aus der Gleichung gefunden werden:

$$R \cdot \frac{n(\beta_1 - \beta_3)}{(n-1)\beta_3} = f \cdot \frac{b_1 - \beta_1}{b_1} - y .$$

Ich habe für den eigentümlichen Bau der Linse erwiesen, daß ihre Brennweite kürzer sei, als wenn sie ganz und gar die Dichtigkeit und das Brechungsvermögen ihres Kerns hätte. Wollte man also eine homogene Linse von gleicher Gestalt und Größe und gleicher Brennweite, wie der Kristallkörper ist, herstellen, so würde man dieser ein noch höheres Brechungsvermögen geben müssen, als selbst sein Kern hat. Dieses Brechungsvermögen einer imaginären gleichgestalteten und gleichwertigen homogenen Linse hat SENFF das totale Brechungsvermögen genannt. Es ist wohl zu unterscheiden von dem mittleren Brechungsvermögen, welches dem arithmetischen Mittel sämtlicher Schichten entspricht. Das totale ist im Gegenteil höher als das höchste Brechungsvermögen der dichtesten Teile der Linse. Ich gebe hier zunächst eine Zusammenstellung der von mir für menschliche Linsen gefundenen Werte, die Lineardimensionen in Millimetern. Brennweite und Hauptpunkte beziehen sich auf den Fall, wo die Linse von Glasfeuchtigkeit umgeben ist. Die Krümmungshalbmesser sind durch Spiegelung bestimmt.

1) Brennweite	45.144	47.435
2) Abstand des ersten Hauptpunktes von der vorderen Fläche .	2.258	2.810
3) Abstand des zweiten Hauptpunktes von der hinteren Fläche	1.546	1.499
4) Dicke der Linse	4,2	4.314
5) Krümmungshalbmesser im Scheitel der vorderen Fläche . .	10,162	8.865
6) Krümmungshalbmesser im Scheitel der hinteren Fläche . .	5.860	5.889
7) Totales Brechungsvermögen	1.4519	1.4414

Ob aber Form und Brennweite toter Linsen denen des lebenden fernsehenden Auges gleich sind, ist mir durch Messungen, die ich an lebenden Augen ausgeführt habe, zweifelhaft geworden. Ich habe nämlich die Dicke der Linsen an drei lebenden Personen zum Teil um mehr als $^1/_2$ mm kleiner gefunden, als die kleinsten Werte der Dicke sind, die man an toten Linsen findet.[1] Wie man die Entfernung der Pupille von der vorderen Hornhaut findet, ist in § 3 beschrieben. Dicht am Pupillarrande der Iris befindet sich auch die vordere Linsenfläche. Um die Dicke der Linse zu bestimmen, muß man also noch die Entfernung der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut zu ermitteln suchen.

Es sei in Fig. 50 *AA* die Hornhaut, *B* die Linse. Es falle in der Richtung *Cc* Licht in das Auge, werde gebrochen an der Hornhaut und vorderen Linsenfläche, dann an der hinteren Linsenfläche in *i* reflektiert. Der zurückgeworfene Strahl trete bei *d* aus der Hornhaut und gehe fort in der Richtung *dD*, wo er das Auge des Beobachters trifft. Jetzt bringe der Beobachter sein Auge nach *C* genau an die Stelle des Lichts und das Licht nach *D* genau an die frühere Stelle seines Auges, so wird ein Lichtstrahl wieder genau auf demselben Wege, nur in umgekehrter Richtung *DdicC* vom Lichte zum Auge des Beobachters gehen, und es wird bei dieser zweiten Stellung wieder genau dieselbe Stelle der hinteren Linsenfläche das Licht zurückwerfen, wie bei der ersten. Indem man den Ort des Lichts und des Auges des Beobachters, den Ort des beobachteten Auges, sowie den Fixationspunkt des letzteren durch passende Abmessungen bestimmt, erhält man die Winkel, welche die Linien *Cc*, *Dd* und die Gesichtslinie des beobachteten Auges *Gg* miteinander bilden. Um die Punkte *c* und *d* auf der Hornhaut zu finden, bringt man, wenn das Auge des Beobachters in *D* steht, ein kleines Licht entfernt vom Auge in *E* so an, daß für den Beobachter der von der Hornhaut entworfene Reflex dieses Lichts mit dem von der hinteren Linsenfläche entworfenen Reflexe des Lichts *C* zusammenfällt. Dies geschieht, wenn der Strahl *Ed* nach *D* zurückgeworfen wird, wenn also die Halbierungslinie des Winkels *EdD* senkrecht auf der Hornhautfläche steht. Es sei *ed* diese Halbierungslinie. Hat man durch passende Abmessungen den Winkel *EdD* oder *EdG* bestimmt, so berechnet sich daraus leicht der Winkel, den *ed* mit *Gg* bildet, und daraus, wenn man die Form und Krümmung der Hornhaut schon gemessen hat, die Länge des Hornhautbogens, der zwischen beiden liegt, oder die Lage des Punktes *d* auf der Hornhaut. Ebenso wird die Lage des Punktes *c* bestimmt.

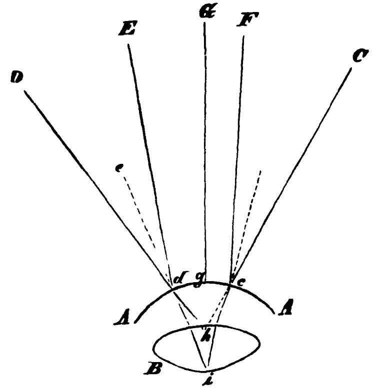


Fig. 50.

Jetzt kennt man also die Lage der Punkte *c* und *d*, die Richtung der Linien *Cc* und *Dd*; man verlängere beide, bis sie sich in *h* schneiden, so ist *h* der scheinbare Ort des spiegelnden Punktes der hinteren Linsenfläche, d. h. der Ort, wie er durch die Substanz der Linse und Hornhaut hin erscheint.

Zur Ausführung der Messung werden die Lichter *C* und *E*, von denen das erstere möglichst groß und hell, das zweite klein sein muß und durch ein blaues Glas zur besseren Unterscheidung seines Reflexes gefärbt werden kann, an einem vom beobachteten Auge mehrere Fuß entfernten horizontalen Maßstabe angebracht. Der Beobachter blickt durch ein kleines Fernrohr, dessen Objektivglas sich ebenfalls dicht an dem Maßstabe befindet, um seinen Ort an diesem bestimmen zu können. Dieses Fernrohr wird dann mit dem Lichte *C* vertauscht.[2]

[1] v. Graefes Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abt. 2. S. 56.
[2] Das Detail der Ausführung ist beschrieben in Graefes Archiv. I. 2. S. 51.

Es ergab sich dabei für drei Augen übereinstimmend, daß der scheinbare Ort der hinteren Linsenfläche nahe vor dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut liegt. Wieviel dieser Ort durch die Brechung in der Hornhaut verschoben sei, können wir berechnen. Da kugelige brechende Flächen den scheinbaren Ort solcher Objekte, die ihrem Mittelpunkte nahe liegen, sehr wenig verändern, so haben individuelle Abweichungen in der brechenden Kraft der wässrigen Feuchtigkeit hier wenig Einfluß auf das Resultat der Rechnung. Ebenso verhält es sich mit der scheinbaren Lagenveränderung des Orts der hinteren Linsenfläche durch die Linse selbst, da diese Fläche jedenfalls dem hinteren Hauptpunkte der Linse sehr nahe ist. Da meine Messungen an toten Linsen über die Distanz der Hauptpunkte nichts Sicheres ergeben hatten, weil sich bei dieser sehr kleinen Größe die Fehler sämtlicher übrigen Messungen zusammenhäufen, so entnahm ich die Korrektion, welche wegen der Brechung in der Linse nötig ist, von Listings schematischem Auge. Durch die Brechung in der Linse erscheint deren hintere Fläche um etwas weniger, als der Abstand der Hauptpunkte der Linse beträgt, vorgerückt. Da nun, wie ich vorher bewiesen habe, der Abstand der Hauptpunkte in der natürlichen Linse kleiner ist, als in einer von derselben Form und homogener Substanz, deren Brechungsvermögen der des Kerns gleich ist, so ist die nach Listings Linse berechnete Korrektion etwas zu groß, und vergrößert im Resultate der Rechnung die Dicke der Linse um ein wenig.

Ich fand für die drei gemessenen Augen im Mittel zweier gut übereinstimmender Versuchsreihen:

	O. H.	B. P.	J. H.
Krümmungsradius der Hornhaut	7.338	7,646	8.154
Scheinbare Entfernung der hinteren Linsenfläche vom Scheitel der Hornhaut	6,775	7.003	6,658
Wahre Entfernung	7.172	7.232	7.141
Entfernung der Pupillarebene vom Scheitel der Hornhaut	4.024	3,597	3.739

Wenn man die Pupillarebene auch als Ort der vorderen Linsenfläche betrachtet, ergeben sich daraus folgende Werte für die Dicke der Linse im lebenden fernsehenden Auge:

3,148 3.635 3.402.

Wenn man dazu auch noch eine Korrektion anbringt, wegen der Hervorwölbung der vorderen Linsenfläche vor dem Pupillarrande, und dem Pupillarrande selbst keine merkliche Dicke beilegt, erhält man die Werte

3.414 3.801 3.555.

Es sind zur Berechnung dieser Korrektion Werte für die Pupillarweite und die Krümmung der vorderen Linsenfläche benutzt, welche an den betreffenden Augen selbst durch Messung erhalten waren. Auch diese letzten Werte sind noch kleiner als die kleinsten Werte der Dicke, welche man bisher an toten Linsen erhalten hat. Diese schwanken nach dem älteren Krause zwischen 4 mm und 5,4 mm.

Da der jüngere Krause die Brechungsverhältnisse von Kalbslinsen unmittelbar nach dem Tode und 24 Stunden später merklich gleich gefunden hat, so ist es unwahrscheinlich, daß die Linse durch Aufnahme von Wasser sich verdicke. Dann müßten wir nämlich eine Abnahme des Brechungsvermögens erwarten. Dagegen erscheint es möglich, daß dieser Unterschied mit den Veränderungen der Linse beim Fern- und Nahesehen zusammenhängt, worauf wir unten in § 12 noch zurückkommen werden.

Es bleibt noch übrig, auseinander zu setzen, inwieweit sich bis jetzt die optischen Kardinalpunkte des Auges bestimmen lassen. Ich werde mich dabei an Listings

schematisches Auge anschließen, welches jedenfalls von dem wahren Mittel nicht weit abweichen kann, wie dies auch durch meine eigenen Messungen zum Teil wieder bestätigt wird. Wenigstens, wo man bei physiologisch-optischen Berechnungen überhaupt Mittelwerte gebrauchen muß und darf, und nicht die Werte für das besondere individuelle Auge ermitteln kann, auf welches sich die Berechnungen beziehen, wird man in Betracht der sehr großen individuellen Verschiedenheiten ebensogut die Werte von LISTINGS schematischem Auge gebrauchen können, als die wirklichen Mittelwerte der menschlichen Augen, wenn man letztere auch kennte. Ich werde deshalb im Verlauf des Werkes LISTINGS Konstanten gebrauchen, wo es nötig ist, will aber hier anführen, in welchem Sinne diese von dem wahren Mittel mir abzuweichen scheinen.

Den Radius der Hornhaut setzt LISTING gleich 8 mm; er scheint nach SENFFS und meinen Messungen meist etwas kleiner zu sein. Das Brechungsvermögen der Hornhaut ist nach W. KRAUSE im Durschschnitt etwas höher als der von LISTING nach BREWSTER angenommene Wert $\frac{103}{77} = 1.3379$. Durch beide Umstände werden die Brennweiten der Hornhaut bei LISTING wohl etwas größer als das Mittel. Nennen wir r den Krümmungsradius der Hornhaut, und n das Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit, so ist die vordere Brennweite der Hornhaut nach § 9 Gleichung 3a) und 3b):

$$F_1 = \frac{r}{n-1},$$

die hintere Brennweite derselben:

$$F_2 = \frac{nr}{n-1}.$$

Nach LISTINGS Annahmen wird:

$$F_1 = 23\frac{9}{13}, \quad F_3 = 31\frac{9}{13}.$$

Nehmen wir nach den Beobachtungen von SENFF $r = 7{,}8$, was auch ungefähr mit dem Mittel meiner Beobachtungen stimmt, und nach W. KRAUSE $n = 1{,}342$, so wird:

$$F_1 = 22{,}81. \quad F_2 = 30{,}61.$$

LISTING gibt der Linse seines schematischen Auges das Brechungsverhältnis $\frac{16}{11}$, eine Dicke von 4 mm und Krümmungsradien von 10 und 6 mm. Nach den Gleichungen § 9 13), 13a) und 13b) gibt dies für den Fall, wo die Linse in wässriger Feuchtigkeit liegt, die Brennweite 43.796 mm, den Abstand der Hauptpunkte voneinander 0,2461 mm, den Abstand des vorderen Hauptpunktes von der vorderen Linsenfläche 2.3462, und den des hinteren von der hinteren Fläche 1,4077. Diese Annahmen stimmen sehr nahe überein mit den vorher angeführten Werten, welche ich selbst an zwei Kristallinsen menschlicher Leichen durch direkte Messung gefunden habe. Weiter sind mir keine direkten Messungen der Brennweite an menschlichen Augen bekannt geworden. Daß es bisher unmöglich sei, aus der Form und den Brechungsindices der verschiedenen Linsenschichten die Brennweite zu berechnen, ist oben auseinandergesetzt, und namentlich geht aus dem über diese Brennweite aufgestellten Theoreme hervor, daß es unrichtig ist, die Kristallinse durch eine homogene Linse ersetzen zu wollen, welche die Form und das mittlere Brechungsvermögen derselben habe, wie das von den älteren Optikern meistens geschah, sondern daß im Gegenteile einer solchen Linse ein höheres Brechungsvermögen als das ihrer dichtesten Teile beigelegt werden müsse. Für die Linse eines Ochsen fand SENFF[1] für dieses

[1] VOLKMANN, Artikel Sehen in R. WAGNERS Handwörterbuch d. Physiologie. Bd. III. S. 290.

totale Brechungsvermögen 1,539, während Grenzschicht und Kernteil die Werte 1,374 und 1,453 ergaben. Die aus meinen Messungen folgenden Werte des totalen Brechungsvermögens sind niedriger (1,4519 und 1,4414), und entsprechen etwa nur dem Mittel der Werte, welche W. KRAUSE für das Brechungsverhältnis des Kerns gefunden hat (Max. 1,4807, Min. 1,4252; Mittel 1,4541). LISTING hat vor meinen und W. KRAUSES Untersuchungen damit sehr übereinstimmend $\frac{16}{11} = 1{,}4545$ gewählt.

Sollte sich der Unterschied zwischen toten und lebenden Linsen, den meine Messungen ergaben, als konstant herausstellen, so würde LISTINGS schematisches Auge wahrscheinlich nur einem nahesehenden Auge entsprechen, und wir würden der Linse eines fernsehenden Auges eine größere Brennweite und geringere Dicke beilegen müssen.

Die Entfernung der vorderen Linsenfläche von der vorderen Hornhautfläche hat LISTING gleich 4 mm gesetzt, was dem von mir untersuchten kurzsichtigen Auge O. H. entspricht. Bei kurzsichtigen Augen pflegt überhaupt die vordere Augenkammer tiefer, die Iris flacher zu sein. Bei den übrigen beiden normalsichtigen Augen war die Entfernung geringer. Bei allen dreien lag die hintere Linsenfläche vor dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut. Ich vermute deshalb, daß bei normalsichtigen Augen die Linse im allgemeinen etwas näher der Hornhaut liegt, als LISTING angenommen hat. Jedenfalls würde aber auch der Einfluß dieser Abweichung sehr gering sein.

Wenn die Brennweiten der Hornhaut, die Lage der Hauptpunkte und die Brennweite der Linse gegeben sind, sind die Kardinalpunkte des ganzen Auges nach § 9 Gleichung 11a) bis 11f) zu finden. Die Werte, welche LISTING aus seinen Angaben berechnet hat, sind schon oben angegeben.

Von den Kardinalpunkten am wichtigsten für die Bestimmung der Lage der Bilder auf der Netzhaut sind uns die Knotenpunkte des Auges. Glücklicherweise kann deren Lage jetzt nicht mehr vielem Zweifel unterworfen sein.

Derjenige Punkt, dessen Bilder die beiden Knotenpunkte sind, liegt nach den in § 9 angegebenen Methoden zur Auffindung dieser Punkte zwischen dem Knotenpunkte der Hornhaut, d. h. ihrem Krümmungsmittelpunkte und dem ersten Hauptpunkte der Linse, und seine Abstände von diesen beiden Punkten verhalten sich wie die kleinere Brennweite der Hornhaut zu der der Linse, also nahe wie 1 zu 2. In LISTINGS schematischem Auge beträgt der Abstand des vorderen Hauptpunktes der Linse vom Mittelpunkte der Hornhaut, der bei ihm in die hintere Linsenfläche fällt, 1,627 mm, nach meinen Messungen an lebenden Augen kann die hintere Linsenfläche bis zu 1 mm vor dem Mittelpunkte der Hornhaut liegen; jene Entfernung würde also bis etwa 2,6 steigen können. Der Punkt also, dessen Bilder die beiden Knotenpunkte sind, würde 0,54 bis 0,87 mm vor dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut liegen, ein, wie man sieht, sehr enges Intervall für seine Lage. Der erste Knotenpunkt ist sein durch die Hornhaut entworfenes Bild. Bilder von Objekten, die sehr nahe vor dem Krümmungsmittel einer kugeligen brechenden Fläche liegen, liegen sehr wenig vor ihrem Objekte. Nehmen wir LISTINGS Werte für die Brennweiten der Hornhaut und Linse, so liegt bei seinen Annahmen der vordere Knotenpunkt 0,758 mm vor dem Mittelpunkte der Hornhaut. Wenn dagegen der Punkt, dessen Bild er ist, 0,87 mm vor dem Mittelpunkte der Hornhaut läge, würde der erste Knotenpunkt etwa 1,16 mm vor diesem liegen.

Wir werden daher schwerlich fehlen, wenn wir annehmen, daß in normalen Augen der vordere Knotenpunkt $^3/_4$ bis $^5/_4$ mm vor dem Mittelpunkte der Hornhaut liegt.

Zu erwähnen ist hier noch ein Versuch von VOLKMANN[1], auf experimentellem Wege am menschlichen Auge die Lage des Knotenpunktes zu finden. Ich habe oben

[1] R. WAGNERS Handwörterbuch d. Physiologie. Art. Sehen. S. 286*.

erwähnt, daß, wenn die Strahlen eines Lichts von der äußeren Seite her in das Auge fallen, das Flammenbildchen namentlich bei blonden Personen im inneren Augenwinkel sichtbar werden kann. Er maß den Abstand dieses Bildes von der Hornhaut, während zugleich die Richtung der einfallenden Strahlen und der Gesichtslinie passend bestimmt wurde. Er zeichnete dann den horizontalen Querschnitt des menschlichen Auges, bestimmte in der Zeichnung den Punkt, wo das Netzhautbild durch die Sclerotica erschienen war, und legte durch diesen Punkt eine Linie, welche die Augenachse unter demselben Winkel schnitt, welchen die einfallenden Strahlen mit der Gesichtslinie gebildet hatten. Den Durchschnittspunkt sah er als Knotenpunkt an. Er findet im Mittel von fünf Personen, daß die Knotenpunkte 3,97‴ (8,93 mm) hinter der Hornhaut liegen. Jedenfalls ist dieser Wert etwas zu groß, weil die Knotenpunkte nach dieser Bestimmung hinter dem Krümmungsmittelpunkte der Hornhaut liegen würden, während sie notwendig vor ihm liegen müssen. Die Abweichung in Volkmanns Resultat erklärt sich einmal daraus, daß er den Unterschied zwischen Augenachse und Gesichtslinie noch nicht kannte, und daraus, daß die Lichtstrahlen bei diesem Versuche die brechenden Flächen des Auges unter sehr großen Einfallswinkeln treffen, und die auf die Knotenpunkte und Hauptpunkte bezüglichen Sätze streng genommen nur für nahe senkrechte Inzidenz gelten. Auch Burow[1] bemerkte deshalb bei der Wiederholung von Volkmanns Versuchen über den Knotenpunkt in weißen Kaninchenaugen, daß bei sehr schiefen Inzidenzen die Netzhautbilder der Augenachse näher fallen, als sie es sollten, wenn alle Richtungslinien sich in einem Punkte schnitten. Beide Ursachen müssen dazu beitragen, bei Volkmanns Versuch den Abstand des Knotenpunktes von der Hornhaut etwas größer erscheinen zu lassen, als er wirklich ist.

Endlich will ich hier noch beschreiben, wie man die Zentrierung des Auges, die Lage der Augenachse und der Gesichtslinie untersuchen kann. Es dienen dazu die Spiegelbilder, welche die Hornhaut und die beiden Linsenflächen von einem vor dem Auge befindlichen hellen Lichte entwerfen.

Über das Aussehen dieser Spiegelbilder, und die Art, sie am besten zu beobachten, s. § 12. Es sei in Fig. 51 cd die Achse eines genau zentrierten Auges, bei a das Auge des Beobachters, bei b ein Licht, es sei $ac = cb$ und ab senkrecht auf cd. Unter diesen Umständen würden, wie leicht ersichtlich ist, die in der Achse gelegenen Scheitel der drei reflektierenden Flächen, der Hornhaut, der vorderen und hinteren Linsenfläche, Licht, welches von b auf sie fällt, von b nach a reflektieren, da alles auf beiden Seiten symmetrisch sein soll, und wenn das Auge und Licht ihren Platz tauschten, würde dasselbe wieder der Fall sein müssen, und dabei würden die drei reflektierenden Punkte in derselben perspektivischen Stellung zueinander bleiben. Namentlich würde in beiden Stellungen der Reflex von der vorderen Linsenfläche etwa in der Mitte zwischen den beiden anderen erscheinen müssen, da der scheinbare (durch die Hornhaut gesehene) Ort der vorderen Linsenfläche etwa in der Mitte zwischen der Hornhaut und dem scheinbaren Orte der hinteren Linsenfläche sich befindet.

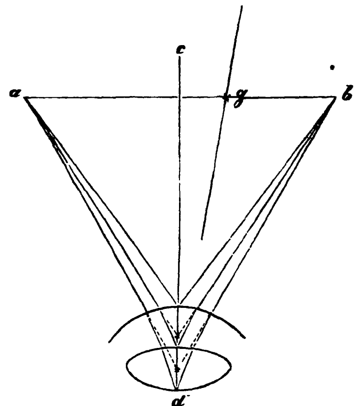


Fig. 51.

Die Untersuchung des Auges in dieser Weise ist nun leicht auszuführen. Es sei ab ein horizontaler Maßstab, an dessen Enden passende Öffnungen für das Auge und das Licht angebracht sind. Dem untersuchten Auge d werde ein Platz in der Linie cd angewiesen, welche auf der Mitte von ab senkrecht steht, und man gebe

[1] Beiträge zur Physiologie d. menschl. Auges. S. 56—60.

ihm einen Fixationspunkt an einem beweglichen Körper *g*, den man so lange verschiebt nach oben und unten, nach rechts und links, bis der Beobachter den Reflex der vorderen Linsenfläche zwischen dem der Hornhaut und dem der hinteren Linsenfläche erblickt. Dann vertausche er den Ort des Lichts und seines Auges. und versuche, ob er bei derselben Stellung des Fixationspunktes auch von der anderen Seite her die drei Reflexe in der angegebenen Stellung erblicken kann. Ist das beobachtete Auge richtig zentriert. so muß es offenbar möglich sein, eine Stellung des Fixationspunktes zu finden, welche die angegebene Forderung erfüllt.

Ich habe noch kein menschliches Auge gefunden. welches dem entsprochen hätte. Wenn von der einen Seite gesehen die drei Reflexe die richtige Stellung hatten. war dies nicht mehr der Fall von der anderen Seite her; man mußte dann das Fixationszeichen mehr oder weniger verschieben. um die richtige Stellung wieder hervorzubringen.

Bei den drei Augen. für welche ich das System von Messungen angestellt habe, mußte der Fixationspunkt sich immer etwas oberhalb der Ebene *a b d* befinden. Die Gesichtslinie lag immer auf der Nasenseite der Linie *c d*. Ihre horizontale Projektion bildete mit der Linie *c d* unter den angegebenen Umständen folgende Winkel:

Auge	Licht kommt	
	von der Nasenseite	von der Schläfenseite
O. H.	3° 47′	4° 57′
B. P.	5° 6′	8° 12′
J. H.	5° 43′	7° 44′

Daraus folgt, daß das menschliche Auge nicht genau zentriert sei. Da jedoch die Unterschiede der zusammengehörigen Winkel verhältnismäßig klein sind, so erfüllt die Linie *c d* für die in den Versuchen gefundenen Stellungen der beobachteten Augen wenigstens annähernd die Ansprüche, welche man an eine Augenachse zu machen hat, und man mag als Winkel zwischen der horizontalen Projektion der Gesichtslinie und der Linie, welche einer Augenachse am besten entspricht, das arithmetische Mittel aus den angeführten Winkeln nehmen. Diese Linie fällt nach meinen Untersuchungen auch nahe genug mit der Hornhautachse zusammen. und geht durch den Mittelpunkt des Hornhautumfangs.

Derjenige, welcher zuerst eine klare Vorstellung von der Brechung der Strahlen im Auge und von der Entstehung und Lage des Netzhautbildchens gehabt hat. ist Kepler. Vor ihm hatte allerdings schon Maurolycus die Kristallinse des Auges mit einer Glaslinse verglichen. und behauptet. daß sie die Strahlen nach der Achse hin breche. aber er leugnete. daß auf der Netzhaut ein umgekehrtes Bild entworfen werde. weil wir ja sonst alles verkehrt sehen müßten. Auch Porta. der Erfinder der *Camera obscura*, verglich das Auge mit einer solchen. meinte aber, daß die Bilder auf der Kristallinse entworfen würden. Erst Kepler, der überhaupt die Grundsätze der Theorie der optischen Instrumente aufgefunden hat. läßt auf der Netzhaut ein umgekehrtes optisches Bild entstehen, und stellt als Bedingung des deutlichen Sehens hin, daß die Strahlen eines leuchtenden Punktes auf einen Punkt der Netzhaut vereinigt werden. Keplers Theorie wurde noch weiter ausgeführt durch den berühmten Jesuiten Scheiner[1], der den Bau des Auges, die Brechung in den Feuchtigkeiten weiter untersuchte. Er bewies, daß die optischen Bilder auf der Netzhaut entworfen werden.

[1] Oculus. Inspruck 1619.

indem er an Augen von Tieren die Netzhaut hinten frei legte. An einem menschlichen Auge stellte er diesen Versuch 1625 zu Rom an. Die brechende Kraft der wässrigen Flüssigkeit setzt er der des Wassers gleich, die Linse dem Glase, den Glaskörper zwischen beide. HUYGENS[1] endlich verfertigte eine künstliche Nachbildung des Auges, an der er die wesentlichsten Vorgänge des Sehens, den Nutzen der Brillen usw. auseinandersetzte.

Die Theorie KEPLERS behielt von nun an ziemlich allgemeine Anerkennung, wenn auch noch einzelne Liebhaber paradoxer Theorien sich in Widersprüchen dagegen gefielen. So N. TH. MÜHLBACH[2] und CAMPBELL[3], welche die Existenz des Netzhautbildchens leugnen, LEHOT[4], der im Glaskörper ein räumliches Bild der Gegenstände entstehen läßt. PLAGGE[5] läßt das Auge wie einen Spiegel wirken, und hält das durch Spiegelung auf der Hornhaut entstehende Bildchen für das Objekt des Sehens. J. READE[6] stimmt ihm bei und läßt es durch die Nerven der Hornhaut empfinden. MAYER[7] widerlegt die Ansicht von PLAGGE, stellt aber eine ebenso wunderliche auf, daß die Netzhaut als Hohlspiegel wirke. Ebenso läßt ANDREW HORN[8] das Bild gegen den Glaskörper reflektieren und von hier aus auf den Sehnerven wirken.

Was die Lage der optischen Kardinalpunkte betrifft, so erhob sich zunächst eine Schwierigkeit für den hinteren Brennpunkt, weil nach der Rechnung, die auf die gemessenen Dimensionen und Brechungsverhältnisse des Auges gestützt war, dieser Punkt hinter die Netzhaut zu fallen schien. Der Grund davon lag darin, daß man für die Kristallinse das mittlere Brechungsverhältnis ihrer einzelnen Schichten wählen zu müssen glaubte.[9] VALLEE[10] glaubte deshalb annehmen zu müssen, daß das Brechungsverhältnis des Glaskörpers von vorn nach hinten zunehme. PAPPENHEIM[11] will wirklich solche, wenn auch sehr kleine Unterschiede durch den Versuch gefunden haben. Über die Lage der Knotenpunkte des Auges herrschte vor den theoretischen Arbeiten von GAUSS einige Verwirrung unter Physikern und Physiologen, weil die Theorie der optischen Instrumente bis dahin sich ausschließlich mit Systemen brechender Flächen beschäftigt hatte, deren Entfernung voneinander vernachlässigt werden konnte, wie das z. B. bei den Objektivgläsern der Fernrohre der Fall war. Im Auge ist die Entfernung der brechenden Flächen voneinander im Vergleich zur Brennweite des ganzen Systems aber ziemlich beträchtlich, und wegen der mangelnden Ausbildung der Theorie wußte man sich die Fragen, auf die es ankam, nicht scharf zu stellen. Man suchte lange nach dem Punkte, der im Auge dem optischen Mittelpunkte der Glaslinsen entspräche und dadurch charakterisiert würde, daß der durch ihn gegangene Strahl ungebrochen durch die Augenmedien ginge. Wenn wir uns beide Knotenpunkte in einen zusammenzuziehen erlauben, so würde dieser dem gesuchten Punkte entsprechen. Man verwechselte namentlich auch diesen Punkt mit demjenigen Punkte, in welchem sich Linien schneiden, welche durch die im Gesichtsfelde sich deckenden Punkte verschieden entfernter Gegenstände gelegt sind. Der letztere, den wir Kreuzungspunkt der Visierlinien nennen wollen, ist, wie wir im nächsten Paragraphen zeigen werden, der Mittelpunkt des von der Hornhaut entworfenen Bildes der Pupille.

[1] Dioptrica in Opera posthuma. Lugduni 1704. p. 112.
[2] Inquisitio de visus sensu. Vindob. 1816.
[3] *Annals of philosophy*. X. 17. — Deutsches Archiv. IV. 110.
[4] *Nouvelle Théorie de la Vision*. Paris 1825.
[5] HECKERS Annalen. 1830. S. 404.
[6] *Annals of philos.* XV. 260.
[7] MUNCKE, Art. Gesicht in GEHLERS Wörterbuch. Das dortige Zitat ist falsch.
[8] *The seat of vision determined.* London 1813.
[9] MOSER in DOVES Repertorium. V. 337—349*. — FORBES, *Proc. Edinb. Roy. Soc.* 1849. Dezbr. p. 251.
[10] Comptes rendus. 1845. XIV. 481.
[11] Ibid. XXV. 901.

und wesentlich vom Knotenpunkte verschieden. MUNCKE[1] identifiziert beide Punkte und verlegt sie in die Mitte der Linse. BARTELS[2] dagegen in das Zentrum der Hornhaut. VOLKMANN[3] nennt den Punkt, wo sich Linien, die von einzelnen Punkten der Netzhautbilder nach den entsprechenden Punkten des Objekts gezogen werden, schneiden, Kreuzungspunkt der Richtungsstrahlen, später, nach MILES Einwendungen, der Richtungslinien. Er zeigt experimentell an Augen weißer Kaninchen, daß wirklich alle Richtungslinien in einem Punkte sich schneiden, und bestimmt die Lage dieses Punktes, welcher zwischen beide Knotenpunkte fallen muß, für das Kaninchenauge. Er findet, daß derselbe hinter die Linse fällt. Er versuchte denselben Punkt nach einer anderen Methode am lebenden menschlichen Auge zu finden. Zwei 6 Zoll vom Auge entfernte Haarvisiere werden durch zwei dem Auge nähere Diopter betrachtet, und letztere so eingestellt, daß die Haare gleichzeitig in der Mitte der Diopteröffnungen erscheinen. Jedes Haar mit der zugehörigen Diopteröffnung, durch eine gerade Linie verbunden, gibt eine Visierlinie. VOLKMANN würde also den Kreuzungspunkt der Visierlinien im Auge haben finden können, wenn die von ihm beobachteten Personen imstande gewesen wären, gleichzeitig und ohne Bewegung des Auges beide Haare in ihren Dioptern zu sehen. Dies ist aber außerordentlich schwer, weil man dann nur eines direkt sehen kann, und das andere durch indirektes Sehen auf den Seitenteilen der Netzhaut erkennen muß. Die Experimentierenden haben deshalb ohne Zweifel die beiden Diopter nacheinander direkt betrachtet, und ihre Visierlinien schnitten sich im Drehungspunkte des Auges, den VOLKMANN demzufolge für identisch mit dem Kreuzungspunkte der Richtungslinien erklärte.

MILE[4], KNOCHENHAUER[5] und STAMM[6] stritten gegen VOLKMANNS Folgerungen. Ersterer zeigte, daß Richtungslinien und Visierlinien nicht notwendig identisch seien, und erklärte den Mittelpunkt der Hornhaut für den Kreuzungspunkt der Richtungslinien, weil er die Brechung in der Linse glaubte vernachlässigen zu dürfen. Daraus folgert er denn, daß die Richtungslinien nicht notwendig durch die Mitte eines Zerstreuungskreises zu gehen brauchen, welcher im Auge von einem nicht deutlich gesehenen Objekte entworfen wird. KNOCHENHAUER suchte MILES Beweis, daß das Decken der Bilder im Gesichtsfelde unabhängig sei von den Richtungslinien, zu vereinfachen, und vermeidet dabei MILES bei dem damaligen Stande der theoretischen Kenntnisse allerdings bedenkliche und in der Tat nur annähernd richtige Voraussetzung, daß der Kreuzungspunkt der Richtungslinien für verschiedene Objektabstände gleich sei. Auch BUROW[7] widerlegte VOLKMANNS Folgerungen, benutzte dessen Methode, um den Drehpunkt des Auges zu bestimmen, und schlug einen neuen Weg ein, den Kreuzungspunkt der Richtungslinien zu bestimmen, der aber aus einem von LISTING später aufgedeckten Grunde auch nicht zum Ziele führte.

MOSER[8] war der erste, der die theoretischen Arbeiten von GAUSS[9] und BESSEL[10] auf das Auge anwendete, und aus den bis dahin ausgeführten Bestimmungen der Form der brechenden Flächen und der Brechungsverhältnisse die Lage der beiden Knotenpunkte, die er übrigens Hauptpunkte nennt, berechnete. Die Werte, welche er für

[1] GEHLERS physik. Wörterbuch neu bearb. Leipzig 1828. Art. Gesicht. Bd. IV. 2. S. 1434*.

[2] Beiträge zur Physiol. d. Gesichtssinns. Berlin 1834. S. 61.

[3] Neue Beiträge zur Physiol. d. Gesichtssinns. Leipzig 1836. Kap. IV. — POGGENDORFFS Ann. XXXVII. 342.

[4] POGGENDORFFS Ann. XLII. 37—71. 235—263*. Dagegen VOLKMANN, ibid. XLV. 207 bis 226*.

[5] Ibid. XLVI. 248—258*.

[6] Ibid. LVII. 346—382*.

[7] Beiträge zur Physiologie u. Physik d. menschl. Auges. Berlin 1841. S. 26—93.

[8] DOVE, Repertorium d. Physik. V. 337 u. 373.

[9] Dioptrische Untersuchungen. Göttingen 1841.

[10] Astronomische Nachrichten. XVIII. Nr. 415.

die Entfernung dieser Punkte von der Hornhaut fand, waren 3.19 und 3,276 Par.-Lin. (7.18 und 7.37 mm). Da er aber als Brechungsverhältnis der Kristallinse Brewsters Mittelwert 1.3839 angenommen hatte, und die Strahlen ferner Lichtpunkte sich dabei erst hinter der Netzhaut vereinigten, glaubte er den Radius der Hornhaut verkleinern zu müssen von 3,39‴ auf 2,88‴, und berechnete danach noch andere Werte für den Abstand der Knotenpunkte von der Hornhaut, nämlich 2,835‴ und 2.890‴ (6.38 und 6.50 mm).

Listing[1] erörterte die Eigenschaften der Haupt- und Knotenpunkte (welchen letzteren er den Namen gab) in ihrer Beziehung zum Auge, gab angenäherte Werte für ihre Lage. und hob namentlich hervor, daß der Brechungskoeffizient der Linse, wenn man diese sich homogen denke. höher gesetzt werden müsse als der ihres dichtesten Teils. Volkmann[2] machte dann noch den schon oben erwähnten Versuch, die Lage der Knotenpunkte im lebenden menschlichen Auge experimentell zu bestimmen. Endlich gab Listing[3] neben einer vollständigen mathematischen Theorie eine Berechnung der Zahlenwerte nach den besten bis dahin ausgeführten Messungen.

1575. Fr. Maurolyci Photismi de lumine et umbra ad Perspectivam et radiorum incidentiam facientes. Venetiis 1575. Messinae 1613. — Eine spätere Gesamtausgabe seiner optischen Abhandlungen führt den Titel: Fr. Maurolyci, Abbatis Messanensis, theoremata de lumine et umbra, ad Perspectivam et radiorum incidentiam facientia; Diaphanorum partes seu libri tres, in quorum primo de perspicuis corporibus, in secundo de Iride, in tertio de organi visualis structura et conspicillorum formis agitur: Problemata ad Perspectivam et Iridem pertinentia. His accesserunt Christoph. Clavii e. S. J. notae. Lugduni 1613.

1583. Jo. Bapt. Portae Neap. de refractione Optices parte libri novem. Neapoli 1583. Liber III—VIII.

1602. *Jo. Kepler ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur. Francofurti 1604. Cap. V.

1611. Kepler, Dioptrice, seu demonstratio eorum, quae visui et visibilibus, propter conspicilla non ita pridem inventa, accidunt. Augustae Vindelicorum 1611.

1619. C. Scheiner, Oculus, sive fundamentum opticum. Innspruck 1619. London 1652.

1695. Huygens († 1695), Opera posthuma. Dioptrica. Lugduni 1704. p. 112.

1759. W. Porterfield, *A treatise on the eye.* Edinb. 1759. Vol. I. Book 3. Chapt. 2*.

1776. J. Priestleys Geschichte der Optik; übers. von G. S. Kluegel. Leipzig 1776 (Ältere Geschichte; Berechnung der Brennweite S. 465)*.
Rumball, *Annals of Philos.* II. 376.

1813. Andrew Horn, *The seat of vision determined.* London 1813.

1816. N. Th. Mühlbach, Inquisitio de visus sensu. Vindobonae 1816.
Magendie, *Précis élémentaire de Physiologie.* Paris. Vol. I. p. 59.

1817. Campbell, *Annals of Philos.* X. 17.
Deutsches Archiv. IV. 110.
J. Read, *Annals of Philos.* XV. 260.

1825. C. J. Lehot, *Nouvelle Théorie de Vision.* 1825.

1828. G. R. Treviranus, Beiträge zur Anatomie und Physiologie der Sinneswerkzeuge. Bremen 1828. Kap. I*.
Muncke in Gehlers Physikalischem Wörterbuch; neu bearbeitet. Leipzig 1828. Art. Gesicht. IV. 2. S. 1364*.

1830. Plagge, Heckers Annalen 1830. S. 404.

1834. Bartels, Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. Berlin 1834. S. 61.

1836. A. W. Volkmann, Untersuchung über den Stand des Netzhautbildchens. Poggendorffs Ann. XXXVII. 342*. — Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig 1836. Kap. IV.

---

[1] Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen 1845.

[2] R. Wagners Handwörterbuch d. Physiologie. Art. Sehen. S. 286*.

[3] Ebenda Art. Dioptrik des Auges.

1837. Joh. Mile, Über die Richtungslinien des Sehens. Poggendorffs Ann. XLII. 37 u. 235*.
1838. Volkmann, Poggendorffs Ann. XLV. 207*. (Erwiderung gegen den Vorigen.)
1839. Gerling, Über die Beobachtung von Netzhautbildern. Poggendorffs Ann. XLVI. 243*.
Knochenhauer, Über die Richtungsstrahlen oder Richtungslinien beim Sehen. Poggendorffs Ann. XLVI. 248*.
1841. A. Burow, Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. Berlin 1841. S. 16—93*.
1842. Vallée, *Comptes rendus*. XIV. 481.
W. Stamm, Über Volkmanns Richtungslinien des Sehens. Poggendorffs Ann. LVII. 346*.
1843. A. W. Volkmann, J. Müllers Archiv f. Anat. u. Physiol. 1843. S. 9 (gegen Burow).
1844. *L. Moser, Über das Auge, in Doves Repertorium d. Physik. S. 337—349*.
1845. J. B. Listing, Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen 1845 (abgedr. aus. d. Göttinger Studien). S. 7—21*.
L. L. Vallée, *Comptes rendus*. XX. 1338. — *Institut*. No. 393. p. 166.
1846. *A. W. Volkmann, Artikel Sehen in R. Wagners Handwörterbuch der Physiologie. III. 1. S. 281—290*.
1847. F. C. Donders, Holländische Beiträge zu den anat. u. physiol. Wissensch. I. S. 107 bis 112*.
1849. J. D. Forbes, *Note respecting the dimensions and refracting power of the eye*. Proceedings Edinb. Roy. Soc. Dezbr. 3. 1849. p. 251. — Silliman Journal. (2) XIII. 413.
1851. *J. B. Listing, Artikel Dioptrik des Auges in R. Wagners Handwörterbuch d. Physiol. IV. 451—504*.
1854. H. Helmholtz, Graefes Archiv für Ophthalmologie. I. 2. S. 1—74*.

Messungen der Brechungsverhältnisse:

1710. Hawksbee, Phil. Transact. 1710. p. 204.
1785. A. Monro. II. *On the structure and physiology of fishes*. p. 60.
1801. Th. Young, Phil. Transact. 1801. I. 40*.
1818. Chossat, *Bulletin des sc. par la Société philomat. de Paris*. A. 1818. Juin. p. 294. — *Ann. de ch. et de ph.* VIII. p. 217.
1819. D. Brewster, Edinb. Philos. Journ. 1819. Nr. 1. p. 47.
1840. Cahours et Becquerel, *Institut*. 1840. p. 399.
1847. S. Pappenheim, *Comptes rendus*. XXV. 901. — *Arch. d. sc. ph. et natur.* VII 78.
Quesnel, *Revue scient.* XXXII. 144.
1849. Bertin, *Comptes rendus*. XXVIII. 447. — *Institut*. 1849. No. 796. p. 105. — *Ann. d. ch. et de ph.* XXVI. 288. — *Arch. d. sc. ph. et nat.* XII. 45. — Poggendorffs Ann. LXXVI. 611.
1850. Engel, Prager Vierteljahrsschrift für prakt. Heilk. 1850. I. 152.
H. Mayer ebenda. 1850. IV. Beilage und 1851. IV. 92.
1852. Ryba, ebenda. 1852. II. 95.
1855. W. Krause, Die Brechungsindizes der durchsichtigen Medien d. menschl. Auges. Hannover 1855*.

Nachtrag.

Donders gibt folgende Übersicht einer großen Anzahl von Messungen der Hornhautkrümmung in der Gesichtslinie. Die Mittelwerte derselben waren in Millimetern.

A. Männer.

1.	20	unter	20	Jahren	7,932
2.	51	unter	40	„	7,882
3.	28	über	40	„	7,819
4.	11	über	60	„	7,809
				Mittel	7,858
				Maximum	8,396
				Minimum	7,28

B. Weiber.

1.	6 unter 20 Jahren	. . . .	7,720
2.	22 unter 40 „	. . . .	7,799
3.	16 über 40 „	. . . .	7,799
4.	2 über 60 „	. . . .	7,607
		Mittel	7,799
		Maximum	8,487
		Minimum	7,115

C. Nach der Sehweite.

1.	27 Normalsichtige	. . . .	7,785
2.	25 Myopische	. . . .	7,874
3.	26 Hypermetropische	. . . .	7,96

1852—61. L. L. VALLÉE, *Théorie de l'oeil. C. R.* XXXIV, 321—323; 718—720; 720—722; 789—792; 872—876. XXXV, 679—681. LI, 678—680. LII, 702—703; 1020 bis 1021. *Mém. des savants étrangers.* XII, 204—264. XV, 98—118; 119—140.

1857. W. ZEHENDER, Über die BREWSTERsche Methode zur Bestimmung der Brechungsexponenten flüssiger und festweicher Substanzen. Archiv für Ophthalmol. III, 2, S. 99.

1858. N. LUBIMOFF, *Recherches sur la grandeur apparente des objets. C. R.* XLVII, 24—27. *Ann. de chimie.* (3), LIV, 13—27.

1860. BRETON, *Note sur une propriété du cristallin de l'oeil humain. C. R.* L, 498—499.

1864. GIRAUD TEULON, *Nouvelle étude de la marche des rayons lumineux dans l'oeil. Ann. d'oculistique.* 1864.

— F. C. DONDERS, *On the anomalies of accommodation and refraction of the eye.* London. p. 38—71.

§ 11. Zerstreuungsbilder auf der Netzhaut.*

Wenn Licht von einem leuchtenden Punkte in das Auge fällt, so bildet dasjenige, welches durch die kreisförmige Pupille hindurchgegangen ist, hinter der Pupille einen Strahlenkegel, dessen Basis kreisförmig und nach vorn, dessen Spitze nach hinten gekehrt ist, und dem Bilde des leuchtenden Punktes entspricht. Jenseits ihres Vereinigungspunktes divergieren die Strahlen wieder. Es sei in Fig. 52 a der leuchtende Punkt, $b_, b_{,,}$ die Pupille, c der Konvergenzpunkt der Strahlen, $cd_,$ die Verlängerung des Strahles $b_, c$, ebenso $cd_{,,}$ die Verlängerung von $b_{,,} c$. Wenn der Vereinigungspunkt der Strahlen gerade auf die Fläche der Netzhaut trifft, so beleuchtet der einzelne leuchtende Punkt a nur einen einzelnen Punkt c der Netzhaut, und es wird ein deutliches Bild des leuchtenden Punktes entworfen. Wenn aber die Netzhaut vor oder hinter dem Vereinigungspunkte der Strahlen, etwa in $f_, f_{,,}$ oder in $g_, g_{,,}$ von dem Strahlenkegel getroffen würde, so würde nicht bloß ein einzelner Punkt, sondern eine dem kreisförmigen

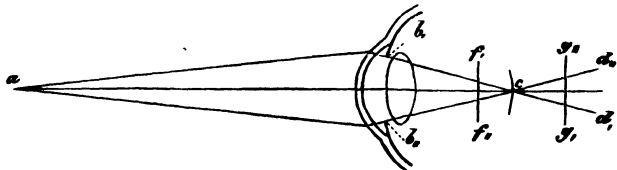


Fig. 52.

* Vgl. Kap. 3 der nach dem ersten Abschnitte folgenden Zusätze! G.

Durchschnitte des Strahlenkegels entsprechende Kreisfläche der Netzhaut erleuchtet werden. Man nennt einen solchen von dem Licht eines leuchtenden Punktes außerhalb des Auges beleuchteten Kreis der Netzhaut einen **Zerstreuungskreis**. Die Kreisform entspricht, wie aus dem Gesagten erhellt, der kreisförmigen Gestalt der Pupille. Wird deren Form oder die Grundfläche des einfallenden Lichtkegels geändert, was namentlich auch dadurch geschehen kann, daß man einen Schirm mit einer beliebig gestalteten kleinen Öffnung von kleinerem Durchmesser als die Pupille dicht vor die Hornhaut bringt, so erhalten auch die Zerstreuungsfelder eine entsprechende andere Form, welche, auf den mittleren Teilen der Netzhaut wenigstens, der Grundfläche des Strahlenkegels immer geometrisch ähnlich ist. Sehr kleine Zerstreuungsbilder im Auge, welche in geringer Entfernung vom Vereinigungspunkte der Strahlen auf der Netzhaut entworfen werden, zeigen auffallende Abweichungen von diesen Regeln, wovon wir in § 14 weiter handeln werden.

Objektiv kann man das Entstehen der Zerstreuungsbilder leicht nachahmen, indem man eine Sammellinse aufstellt, vor ihr in einiger Entfernung ein kleines Licht, oder besser einen Schirm mit einer engen Öffnung, durch welche ein Licht scheint, und das Bild dieses Lichtes hinter der Linse auf einem weißen Papiere auffängt, welches man der Linse bald nähert, bald von ihr entfernt. Dabei sieht man, daß nur in einer gewissen Entfernung von der Linse das Bild des Lichtpunktes scharf gezeichnet und punktförmig ist, sonst sich zu lichten Kreisen ausdehnt.

Bringt man vor der Linse als Objekt eine helle Linie an, z. B. einen schmalen Spalt in einem dunklen Schirme, hinter welchem ein Licht steht, so decken sich die Zerstreuungskreise der einzelnen hellen Punkte dieser Linie, wie in Fig. 53 *b* angedeutet ist, teilweise, und es erscheint statt der scharfen Linie *a* eine helle Figur ähnlich der *c*.

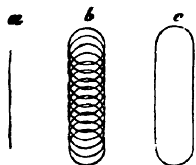


Fig. 53.

Wird eine scharf begrenzte gleichmäßig helle Fläche in einem Zerstreuungsbilde abgebildet, so bleibt die Mitte der Fläche in unveränderter Helligkeit, die Ränder aber erscheinen verwaschen, so daß an ihnen die Helligkeit der Mitte der Fläche allmählich in die Helligkeit des umgebenden Grundes übergeht.

Dergleichen Zerstreuungsbilder können nun auch im Auge entworfen werden. Allerdings können wir nicht die Netzhaut willkürlich hin- und herrücken gleich dem Papierschirme bei der beschriebenen objektiven Darstellung der Zerstreuungsbilder, aber wir können den leuchtenden Punkt dem Auge nähern und ihn davon entfernen, so daß sein Bild im Glaskörper vor- und zurückweicht. Wie bei einem jeden optischen Systeme von kugeligen brechenden Flächen liegen die Bilder verschieden entfernter Gegenstände auch beim Auge in verschiedenen Entfernungen von den brechenden Flächen. Das Bild eines unendlich weit entfernten hellen Punktes liegt in der hinteren Brennebene des Auges, das Bild eines näheren leuchtenden Punktes hinter der Brennebene. Wenn also eines von diesen Bildern auf die Netzhaut fällt und scharf gezeichnet ist, so bildet das andere notwendig einen Zerstreuungskreis. Daraus folgt:

Wir können verschieden weit vom Auge entfernte Gegenstände nicht gleichzeitig deutlich sehen.

Um sich davon zu überzeugen, halte man in der Entfernung von etwa 6 Zoll vor dem Auge einen Schleier oder anderes durchsichtiges Gewebe, und

dahinter in etwa 2 Fuß Entfernung ein Buch, und schließe ein Auge, so wird man sich leicht überzeugen, daß man es in seiner Gewalt hat, nacheinander bald die Fäden des Schleiers, bald die Buchstaben des Buches zu betrachten und deutlich zu sehen, daß aber die Buchstaben undeutlich werden, während man die Fäden des Schleiers betrachtet, und daß der Schleier nur noch als eine leichte gleichmäßige Verdunkelung des Gesichtsfeldes erscheint, während man die Buchstaben fixiert. Wenn man, ohne die Richtung des Auges zu verändern, bald den näheren, bald den ferneren Gegenstand betrachtet, fühlt man bei jedem solchen Wechsel, daß das Auge eine gewisse Anstrengung macht, um den Wechsel zustande zu bringen.

Denselben Versuch kann man mannigfach variieren. Man wende sich nach einem Fenster und halte etwa 6 Zoll vor dem Auge senkrecht eine Nadel, so daß sie einen der horizontalen Stäbe des Fensters kreuzt, so kann man entweder die Nadel fixieren, während dabei der Stab des Fensterkreuzes als verwaschener dunkler Streifen erscheint, oder das Fensterkreuz und die Gegenstände der Landschaft draußen fixieren, während die Nadel nur noch als ein verwaschener dunkler Streifen im Gesichtsfelde erscheint. Ebenso, wenn man durch ein Loch von 1 bis 2 Linien Durchmesser nach fernen Gegenständen sieht, kann man bald diese, bald die Ränder des Loches scharf sehen, nie aber beide zugleich. Indessen ist der Versuch in seiner ersten Gestalt am überraschendsten, und dabei zugleich jeder Verdacht, daß eine Änderung in der Richtung der Sehachse von Einfluß sei, am besten beseitigt.

Bei allen diesen Versuchen überzeugt man sich, daß, wenn man auch nicht gleichzeitig zwei verschieden entfernte Gegenstände deutlich sehen kann, es doch gelingt, indem man sie nacheinander betrachtet, und daß man willkürlich bald den einen, bald den anderen deutlich, mit scharf begrenzten Umrissen erblicken kann.

Die eigentümliche Veränderung, welche im Zustande des Auges vor sich geht, um bald ferne, bald nahe Gegenstände deutlich zu sehen, nennt man die Akkommodation oder Adaptation* des Auges für die Entfernung des Objekts.

Für sehr ferne Objekte kann sich die Entfernung des Objekts sehr beträchtlich verändern, ohne daß die Entfernung seines optischen Bildes von den Hauptpunkten des Auges sich merklich ändert. Wenn ein Auge für unendliche Entfernung akkommodiert ist, so sind die Zerstreuungskreise auch für Objekte von etwa 12 Meter Entfernung immer noch so klein, daß keine merkliche Undeutlichkeit des Bildes entsteht. Ist aber das Auge für einen nahen Gegenstand akkommodiert, so erscheinen Gegenstände in sehr kleinen Distanzen vor oder hinter jenem schon undeutlich. Den Teil der Gesichtslinie, in welchem die bei einem gegebenen Akkommodationszustande des Auges ohne merkliche Undeutlichkeit sichtbaren Objekte liegen, hat J. Czermak die Akkommodationslinie genannt. Die Länge dieser Akkommodationslinien ist desto größer, je weiter ihr Abstand vom Auge ist, und für einen sehr großen Abstand unendlich groß.

Von dem angegebenen Verhalten kann man sich leicht überzeugen, wenn man vor einem bedruckten Blatte in der Entfernung eines oder einiger Zolle eine Spitze als Fixationspunkt befestigt. Nähert man sich mit dem Auge der Spitze, so weit man sie deutlich sehen kann, und akkommodiert das Auge für die Spitze, so erscheinen die Buchstaben undeutlich; je weiter man sich aber

---

* Letztere Bezeichnung ist nicht mehr gebräuchlich. G.

entfernt, immer das Auge für die Spitze akkommodierend, desto deutlicher werden sie.

Eben weil die Zerstreuungskreise ferner Gegenstände sehr klein sind, wenn das Auge für andere ferne Gegenstände akkommodiert ist, ist es auch möglich zu visieren, d. h. zu erkennen, ob verschieden entfernte Punkte an einer Stelle des Gesichtsfeldes liegen. Streng genommen kann man immer nur einen der beim Visieren betrachteten Punkte deutlich sehen, die anderen in größeren und kleineren Zerstreuungskreisen. Eine genaue Deckung zweier Punkte nehmen wir an, wenn der deutlich gesehene Punkt in der Mitte des Zerstreuungsbildes des anderen liegt. Eine Linie, welche durch zwei sich deckende Punkte gezogen ist, nennen wir Visierlinie. Die Visierlinien kreuzen sich in einem Punkte des Auges, nämlich im Mittelpunkte des von der Hornhaut entworfenen Bildes der Pupille, dem Kreuzungspunkte der Visierlinien.*

Daß bei der Akkommodation nicht bloß, wie mehrere Physiologen früher annahmen, die Art, wie das Netzhautbildchen empfunden wird, sich verändere, sondern daß das optische Bild auf der Netzhaut selbst Veränderungen erleide, läßt sich am unzweifelhaftesten bei der Untersuchung eines lebenden Auges mit dem Augenspiegel nachweisen. Durch dieses Instrument, welches in § 16 beschrieben werden wird, kann man den Hintergrund des Auges, also die Netzhaut mit ihren Gefäßen und die auf ihr entworfenen Bilder, deutlich sehen. Läßt man das beobachtete Auge einen Gegenstand in einer gewissen Entfernung fixieren, so findet man, daß das Bild eines Lichtes, welches in derselben Entfernung steht, auf der Netzhaut ganz scharf entworfen wird, während man in dem hellen Grunde des Bildes auch die Gefäße und sonstigen anatomischen Einzelheiten der Netzhaut deutlich sieht. Wenn man aber das Licht sehr nähert, wird sein Bild undeutlich, während die Einzelheiten des Gewebes der Netzhaut deutlich bleiben. Die Versuche, die Veränderungen der Bilder an toten Augen, denen man den hinteren Teil der Sclerotica und Chorioidea weggenommen hatte, zu sehen, oder an Augen weißer Kaninchen, deren Sclerotica sehr durchscheinend ist, sind meist gescheitert, weil unter diesen Umständen die Bilder überhaupt nicht mehr genau genug sind, um kleine Veränderungen an ihnen wahrzunehmen. Auch für das lebende Auge sind nur an verhältnismäßig feinen Gegenständen die Veränderungen des Bildes bei veränderter Adaptation auffällig. Größere Gegenstände erkennen wir auch bei unpassender Akkommodation noch ihrer Form nach. In dem Netzhautbilde eines toten Auges erscheinen aber überhaupt nur noch größere Objekte, die feineren sind verwischt, wie man sogleich erkennt, wenn man es künstlich vergrößert, so daß die Bilder dem Beobachter in ähnlicher Größe erscheinen, wie sie dem beobachteten Auge, als es lebte, erschienen waren.

Eine noch nähere Erläuterung der Adaptationserscheinungen und der verschiedenen Lage des Vereinigungspunktes der Strahlen zur Netzhaut gibt der Scheinersche Versuch. Man steche durch ein Kartenblatt mit einer Nadel zwei Löcher, deren Entfernung kleiner ist als der Durchmesser der Pupille, und blicke nun durch die beiden Löcher nach einem feinen Gegenstande hin, der sich dunkel auf hellem Grunde oder hell auf dunklem Grunde scharf abzeichnet,

* Da das Visieren die zentrale Sehschärfe erfordert, so kann eigentlich nur von einer einzigen Visierlinie die Rede sein. Dieselbe trifft nach der Brechung im Auge den Mittelpunkt der Netzhautfovea. G.

z. B. nach einer Nadel, die man vor den hellen Hintergrund des Fensters hält, und zwar vertikal, wenn die Löcher des Kartenblatts horizontal nebeneinander liegen, dagegen horizontal, wenn letztere vertikal übereinander stehen. Fixiert man nun die Nadel selbst, so sieht man sie einfach, fixiert man dagegen einen näheren oder ferneren Gegenstand, so erscheint sie doppelt. Schiebt man dann von der Seite her einen Finger über das Kartenblatt, so daß er eines der Löcher verdeckt, so findet man in dem Falle, wo das Bild der Nadel einfach ist, keine andere Veränderung, als daß das Gesichtsfeld dunkler wird. Sieht man dagegen die Nadel doppelt, so verschwindet beim Verdecken der Öffnung eines der Doppelbilder, während das andere unverändert stehen bleibt, und zwar verschwindet, wenn man einen ferneren Gegenstand, als die Nadel ist, fixiert, das linke Bild der Nadel beim Verdecken des rechten Loches; wenn man aber das Auge für einen näheren Gegenstand eingerichtet hat, verschwindet das rechte Bild beim Verdecken des rechten Loches. Hat man sich noch nicht genügend geübt, das Auge für die Nähe und Ferne zu akkommodieren, ohne daß man einen entsprechenden Fixationspunkt hat, so stelle man zwei Nadeln hintereinander vor einem hellen Hintergrunde auf, die eine in 6 Zoll, die andere in 2 Fuß Entfernung, die eine horizontal, die andere vertikal, und fixiere die eine, um die Doppelbilder der anderen zu sehen, wobei man natürlich die Löcher des Kartenblatts stets quer gegen die Richtung der Nadel stellen muß, welche doppelt erscheinen soll.

Macht man drei Löcher in ein Kartenblatt, welche nahe genug zusammenstehen, um gleichzeitig vor die Pupille gebracht zu werden, so erscheinen drei Bilder der Nadel. Haben die Löcher die Stellung wie in Fig. 54 *a*, so erscheinen bei der Akkommodation für einen näheren Gegenstand drei Nadeln in der Stellung wie bei *b*, so daß ihre Köpfe die Stellung der Löcher in gleichem Sinne wiedergeben. Bei der Akkommodation für einen ferneren Gegenstand erscheinen die Nadeln in der Stellung *c*, so daß ihre Köpfe ein umgekehrtes Bild von der Stellung der Löcher geben. Ganz dieselben Doppelbilder zeigen sich, wenn man einen hellen Gegenstand auf dunklem Grunde, eine Öffnung eines dunklen Schirms, durch welche Licht fällt, oder ein Nadelköpfchen, welches Sonnenlicht reflektiert, betrachtet.

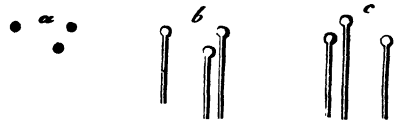


Fig. 54.

Die Erklärung dieser Versuche ergibt sich leicht aus entsprechenden Versuchen mit Glaslinsen. Es sei Fig. 55 *b* eine Sammellinse, vor welcher ein undurchsichtiger Schirm mit zwei Öffnungen *e* und *f* angebracht ist; *a* sei ein leuchtender Punkt und *c* der Vereinigungspunkt für seine Strahlen, nachdem sie durch die Linse gegangen sind. Es werden demgemäß alle Strahlen der beiden Strahlenbündel, welche durch die beiden Öffnungen des Schirms *e* und *f* gehen, sich im Punkte *c* schneiden, und ein weißer Schirm, welcher in *c* angebracht ist, wird nur eine helle Stelle als Bild des Lichts zeigen. Ein Schirm aber, der vor dem Vereinigungspunkte in *m m*, oder hinter ihm in *l l* angebracht ist, wird die den beiden Öffnungen entsprechenden Strahlenbündel gesondert auffangen und zwei helle Stellen zeigen. Denkt man sich statt der Glaslinse die brechenden Mittel des Auges, statt des Schirms die Retina gesetzt, so ergibt sich analog, daß ein Punkt der Retina vom Lichte getroffen wird, wenn ihre Fläche durch den Vereinigungspunkt der Strahlen geht, zwei Punkte dagegen,

wenn sie sich vor oder hinter dem Vereinigungspunkte der Strahlen befindet. Die Stellung des Schirms in *m* entspricht dem Falle, wo das Auge für einen ferneren, die bei *l*, wo es für einen näheren Gegenstand akkommodiert ist. Nur ein scheinbarer Widerspruch zeigt sich. Wenn man nämlich in dem Versuche mit der Glaslinse die obere Öffnung *e* des durchbrochenen Schirms verdeckt, verschwindet bei der Stellung des Schirms in *m* das gleichseitige obere Bild, bei dem fernsehenden Auge aber das entgegengesetzte. Bei der Stellung des Schirms in *l* verschwindet umgekehrt bei der Glaslinse das entgegengesetzte, in dem nahsehenden Auge dagegen das gleichseitige Bild. Der Widerspruch erklärt sich dadurch, daß die Bilder auf der Netzhaut stets umgekehrt sind, also einem tiefer liegenden lichten Gegenstande ein höher stehendes Bild auf der Netzhaut entspricht. Wird also die in *m* stehende Netzhaut bei

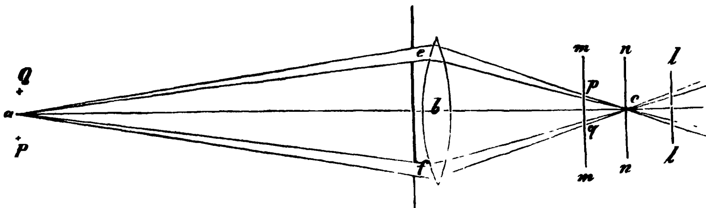


Fig. 55.

p und *q* von Licht getroffen, so schließt der Sehende von dem oberen Punkte *p* auf einen im Gesichtsfelde unterhalb des wirklichen leuchtenden Punktes bei *P* liegenden Gegenstand, und aus dem unteren Punkte *q* auf einen oberhalb bei *Q* liegenden. Wird die Öffnung *e* verdeckt, so verschwindet demnach der obere helle Punkt *p* auf der Netzhaut, und der Experimentierende glaubt deshalb den Gegenstand *P* verschwinden zu sehen, welcher der verdeckten Öffnung entgegengesetzt ist. Umgekehrt beim Fixieren eines nahen Gegenstandes, wo die Netzhaut dem Schirme in *l* entspricht.

Bringt man vor der Glaslinse einen Schirm mit drei Öffnungen, wie in *a* Fig. 54, an, so entstehen auch drei lichte Punkte auf dem in *m* oder *l* gestellten Schirme, und zwar in *m* gleich, in *l* dagegen entgegengesetzt gerichtet als auf dem vorderen Schirme; also wieder umgekehrt, als es scheinbar im Auge der Fall ist, was sich in derselben Weise erklärt, wie eben geschehen ist.

Bringt man vor die Glaslinse einen Schirm mit einer Öffnung, und bewegt ihn hin und her, so bleibt das Bild des lichten Punktes unbeweglich, wenn (siehe in Fig. 55) der Vereinigungspunkt *c* der Lichtstrahlen in den auffangenden Schirm fällt. Steht dieser Schirm aber vor *c* in *m*, so bewegt sich das Bild in demselben Sinne wie die Öffnung vor dem Glase. Steht der auffangende Schirm in *l* hinter dem optischen Bilde, so bewegt es sich in entgegengesetzter Richtung. Entsprechendes findet beim Auge statt. Sieht man durch eine kleine Öffnung eines Kartenblattes nach einer Nadel, fixiert einen fernen Gegenstand und bewegt das Kartenblatt, so bewegt sich die Nadel scheinbar in entgegengesetztem Sinne. Fixiert man dagegen einen näheren Punkt, so bewegt sie sich in gleichem Sinne wie das Kartenblatt. Die Erklärung dieser Versuche ergibt sich leicht aus dem Vorausgeschickten, wenn man für Fig. 55 annimmt, daß der Schirm nicht zwei Öffnungen, sondern nur eine hat, die sich bald in *e*, bald in *f* befindet.

Man kann einen Schirm mit enger Öffnung, welche man vor das Auge bringt, auch benutzen, um Gegenstände deutlich zu sehen, für welche man das Auge nicht akkommodieren kann. Die Grundfläche des in das Auge eindringenden Strahlenkegels wird dadurch kleiner, und in demselben Verhältnisse auch alle seine Querschnitte, zu denen auch der Zerstreuungskreis auf der Netzhaut gehört.

Wenn man einen nahe vor dem Auge befindlichen Gegenstand, der deshalb im Zerstreuungsbilde erscheint, durch eine feine Öffnung betrachtet, erscheint er aus dem angeführten Grunde deutlich und außerdem vergrößert. Ja, er erscheint sogar größer, als wenn man ihn ohne Öffnung bei derselben Entfernung im Zerstreuungsbilde betrachtet. Seine Vergrößerung wird um so bedeutender, je mehr man die Öffnung vom Auge entfernt. Diese Erscheinungen erklären sich auf folgende Weise. Es seien in Fig. 56 a und b zwei leuchtende Punkte des Objekts, S der Schirm, A das Auge. Vom Punkte a fällt durch die Öffnung des Schirms nur der Lichtstrahl $a m_1$ in das Auge, von b $b m_2$. Ist $\beta \alpha$ das dem Objekte $a b$ entsprechende Bild, welches die Augenmedien entwerfen, so geht der Strahl $a m_1$ nach der Brechung nach α und schneidet die Netzhaut in f; der Strahl $b m_2$ geht dagegen nach β und trifft die Netzhaut in g. Zieht man von f und g aus die Linien $f\varphi$ und $g\gamma$ durch den Knotenpunkt des Auges k, so geben diese die Richtungen an, in welchen leuchtende Punkte beim gewöhnlichen deutlichen Sehen liegen müßten, um sich in f und g abzubilden. In diese Linien verlegt unser Urteil deshalb auch die Punkte a und b.

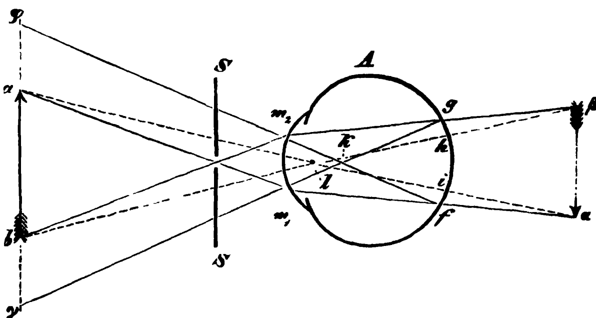


Fig. 56.

Wenn der Schirm sich vom Auge entfernt und dem Objekte nähert, ist leicht ersichtlich, daß die Punkte m_1 und m_2 und ebenso die Linien $m_1 \alpha$ und $m_2 \beta$ mit den Punkten f und g sich von der Augenachse entfernen müssen. Das Netzhautbild wird in diesem Falle also größer.

Nehmen wir den Schirm weg, so entwirft jeder lichte Punkt des Objekts einen Zerstreuungskreis. Die Mittelpunkte der Zerstreuungsbilder von a und b sind dann auf der Netzhaut weniger voneinander entfernt als die Punkte f und g, wo diese Punkte bei vorgehaltenem Schirme sich abbilden. Der Mittelpunkt der Zerstreuungskreise wird bestimmt durch den Achsenstrahl des Strahlenkegels, d. h. durch den Strahl, welcher durch den Mittelpunkt der Pupille gegangen ist. Es sei l dieser Punkt. Der von a durch l nach α gehende Strahl trifft dann die Netzhaut in i, der von b durch l nach β gehende in h. Die Punkte h und i sind also die Mittelpunkte der Zerstreuungsbilder, wenn der Schirm entfernt wird. Sie liegen einander näher als die Punkte f und g.

Sieht man dagegen durch eine enge Öffnung nach entfernten Gegenständen, während man das Auge für die Nähe akkommodiert, so erscheinen die Gegenstände kleiner, und desto kleiner, je weiter man die Öffnung vom Auge entfernt.

Die Entfernungen, für welche sich das menschliche Auge akkommodieren kann, sind bei verschiedenen Individuen sehr verschieden. Man nennt den dem Auge nächsten Punkt, für den eine vollständige Akkommodation ausgeführt werden kann, den Nähepunkt, den entferntesten den Fernpunkt der Akkommodation. Bei normalen Augen pflegt der Nähepunkt in 4 bis 5 Zoll Entfernung zu liegen, der Fernpunkt in sehr großer, vielleicht zuweilen unendlicher Entfernung. Eine unendliche Entfernung des Fernpunktes scheint aber doch, selbst bei Leuten, die im Freien leben und nur ferne Gegenstände zu betrachten haben, mindestens eine große Seltenheit zu sein, da ganz allgemein eine strahlige Figur von den Menschen als Stern bezeichnet zu werden pflegt, und die Allgemeinheit dieses Sprachgebrauchs darauf hinweist, daß sie die Sterne strahlig sehen, was wiederum ein Zeichen ist, daß sie nicht für unendliche Ferne adaptieren, wie in § 14 auseinandergesetzt werden wird.

Kurzsichtige oder myopische Augen nennt man solche, deren Fernpunkt in geringer Entfernung, oft nur wenige Zoll vom Auge liegt; der Nähepunkt rückt dabei gewöhnlich ebenfalls sehr viel näher. Weitsichtige oder presbyopische Augen nennt man dagegen solche, deren Nähepunkt weiter entfernt ist, oft mehrere Fuß vom Auge absteht. Der Fernpunkt dieser Augen scheint im allgemeinen nicht in demselben Verhältnisse in die Ferne zu rücken, vielmehr stehen zu bleiben, so daß die Breite ihrer Akkommodation überhaupt eine geringere wird, und die Fähigkeit einer Veränderung des brechenden Apparates auch wohl ganz verloren geht. Nur als seltenere krankhafte Verbildung und nach der Entfernung der Kristallinse durch Staroperationen kommen so weitsichtige Augen vor, welche imstande sind, konvergierend in das Auge fallende Strahlen auf der Netzhaut zu vereinigen, also z. B. unendlich entfernte Gegenstände durch schwache Sammellinsen deutlich zu sehen. Kurzsichtigkeit pflegt die Folge solcher Beschäftigungen zu sein, bei denen nahe Gegenstände anhaltend und scharf betrachtet werden. Weitsichtigkeit pflegt im höheren Alter zu entstehen, daher der griechische Name Prespyopie (von πρεσβυς, der Greis); auch kommt bei Schiffern, Hirten, Jägern und anderen Personen, welche meist nur auf ferne Gegenstände ihre Aufmerksamkeit zu richten haben, eine Unfähigkeit, das Auge für nahe Gegenstände zu akkommodieren, vor, welche durch Mangel an Übung bedingt zu sein scheint. Das bekannte Mittel, den Beschwerden dieser Zustände abzuhelfen, ist der Gebrauch von Brillen. Kurzsichtige gebrauchen konkave Linsen, welche von fernen Gegenständen nähere Bilder entwerfen, die bis an den Fernpunkt des betreffenden Auges herangerückt werden müssen. Weitsichtige gebrauchen konvexe Linsen, welche von nahen Gegenständen entferntere Bilder entwerfen, für welche ein solches Auge sich akkommodieren kann.

Wenn man das Auge in Wasser taucht, fällt die Brechung der Lichtstrahlen an der Hornhaut fast ganz fort, und es bleibt nur die in der Kristalllinse wirksam, welche nicht hinreicht, um deutliche Bilder auf der Netzhaut zu entwerfen. Das Auge verhält sich dann wie ein überweitsichtiges, und braucht eine stark konvexe Linse als Brille, um irgend etwas zu erkennen.

Um die Größe der Zerstreuungskreise berechnen zu können, bemerke man zunächst, daß alle Strahlen, die außerhalb des Auges auf die scheinbare (d. h. durch die Hornhaut gesehene) Pupille* hinzielen, nach der Brechung in der

* Die nunmehr sogenannte Eintrittspupille. G.

Hornhaut die wirkliche Pupille treffen, und daß sie im Glaskörper so verlaufen, als kämen sie von dem Bilde* der Pupille her, welches die Linse nach hinten zu entwirft. Es ergibt sich dies sogleich aus dem Begriffe des optischen Bildes. Ein gewisser Punkt der wirklichen Pupille und der korrespondierende Punkt ihres Hornhautbildes sind in Rücksicht auf die Brechung an der Hornhaut korrespondierende Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen. Strahlen, die von dem Punkte der wirklichen Pupille aus nach vorn gehen, scheinen vor dem Auge von dem Bilde dieses Punktes zu kommen, und umgekehrt, Strahlen, welche in der Luft nach einem Punkte der scheinbaren Pupille konvergieren, müssen sich nach der Brechung an der Hornhaut in dem entsprechenden Punkte der wirklichen Pupille vereinigen.

Listing nimmt für sein schematisches Auge an, daß die Iris $^1/_2$ mm vor der vorderen Linsenfläche liege, und berechnet, daß alsdann ihr von der Linse entworfenes Bild um $^1/_{15}$ vergrößert und um 0,055 mm nach hinten gerückt sei. Verlegt man dagegen die Pupille dicht an die Vorderfläche der Linse, was naturgemäßer ist, so beträgt die Vergrößerung nur etwa $^1/_{18}$ (genauer $^3/_{53}$), und sie wird um 0,113 mm nach hinten gerückt. Behält man die übrigen Data von Listings schematischem Auge bei, so würde der Abstand des Linsenbildes der Pupille von der Netzhaut gleich 18,534 mm zu setzen sein. Durch die Hornhaut würde dieselbe Pupille dagegen um $^1/_7$ (genauer $^{13}/_{90}$) vergrößert und um 0,578 mm vorgerückt erscheinen.

Die Größe der Zerstreuungskreise auf dem mittleren Teile der Netzhaut läßt sich auf folgende Weise berechnen. Es sei Fig. 57 gf die Augenachse, qg ein vor dem Auge liegendes Objekt, und die Linie qg senkrecht gegen fg. Es sei ferner p das Bild von q und f von g; αd die Netzhaut, welche wir als eine auf die Augenachse senkrechte Ebene betrachten, da nur Bilder auf der Mitte der Netzhaut in Betracht gezogen werden sollen; ab sei das Linsenbild der Pupille, AB das Hornhautbild, beide senkrecht gegen die Augenachse, die von ihren Ebenen in den Punkten c und C geschnitten wird. Die von dem Rande der Pupille ausgehenden Strahlen ap und bp schneiden die Netzhaut in α und β, so daß $\alpha\beta$ ein Durchmesser des Zerstreuungskreises ist, dessen Größe berechnet werden soll. Da ab parallel αd ist, ist nach bekannten geometrischen Sätzen:

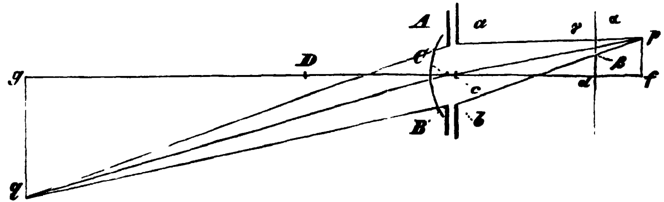


Fig. 57.

$$ap : \alpha p = ab : \alpha\beta$$

$$ap : \alpha p = cf : df, \quad \text{also auch}$$

$$\alpha\beta = \frac{ab \cdot df}{cf} \quad \text{. . . . . 1a)}$$

Fällt die Ebene der Netzhaut mit der hinteren Brennebene des Auges zusammen, und ist D der vordere Brennpunkt des Auges, so können wir wie in § 9 Glei-

* Die Austrittspupille. G.

chung 8) bezeichnen CD mit H_1, cd mit H_2, Cg mit h_1, cf mit h_2 (statt h_{m+1}) und haben dann wie dort

$$\frac{H_1}{h_1} + \frac{H_2}{h_2} = 1 \quad \text{oder}$$

$$\frac{H_1}{h_1} = \frac{h_2 - H_2}{h_2} = \frac{df}{cf}, \quad \text{also}$$

$$\alpha\beta = ab \cdot \frac{H_1}{h_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\text{b}).$$

Wenn c der Mittelpunkt des Linsenbildes der Pupille ist, also $ac = bc$, und der Strahl cp die Netzhaut in γ schneidet, so ist γ der Mittelpunkt des Zerstreuungskreises. Denn wegen des Parallelismus von ab und $\alpha\beta$ verhält sich

$$ac : bc = \alpha\gamma : \beta\gamma$$

$$ac = bc, \quad \text{folglich}$$

$$\alpha\gamma = \beta\gamma.$$

Der Strahl also, welcher die Mitte des Zerstreuungskreises trifft, geht im Glaskörper verlängert durch den Mittelpunkt des Linsenbildes der Pupille. Wir können hinzusetzen, er geht in der vorderen Kammer in der Tat durch den Mittelpunkt der wirklichen Pupille und in der Luft verlängert durch den Mittelpunkt des Hornhautbildes der Pupille.

Daraus folgt, daß, wenn die Mittelpunkte der Zerstreuungskreise für zwei ungleich vom Auge entfernte Punkte aufeinander fallen, der nach diesem gemeinsamen Mittelpunkte von dem Mittelpunkte des Linsenbildes der Pupille gehende Strahl beiden Strahlensystemen gemeinsam sein muß. Die Fortsetzung dieses gemeinsamen Strahls vor dem Auge muß also auch beide leuchtende Punkte treffen, und wird verlängert durch den Mittelpunkt des Hornhautbildes der Pupille gehen. Dasselbe wird der Fall sein, wenn das eine Zerstreuungsbild sich auf einen Punkt reduziert, der im Mittelpunkte des anderen Zerstreuungskreises liegt.

Beim Visieren decken sich zwei ungleich entfernte Punkte, wenn das Bild des einen in die Mitte des Zerstreuungsbildes des anderen fällt, oder die Mittelpunkte beider Zerstreuungsbilder aufeinander fallen, falls beide undeutlich gesehen werden. Die sie verbindende gerade Linie haben wir Visierlinie genannt. Sie muß nach der eben gemachten Auseinandersetzung mit dem Strahle zusammenfallen, der nach dem Mittelpunkte des Hornhautbildes der Pupille geht, und dieser letztere Punkt wird deshalb der Kreuzungspunkt aller Visierlinien sein.

Der Begriff des Gesichtswinkels hängt hiermit nahe zusammen. Wenn man sagt, daß Objekte, die unter gleichem Gesichtswinkel erscheinen, gleiche scheinbare Größe haben, so muß man den Scheitel des Gesichtswinkels in den Kreuzungspunkt der Visierlinien legen. Gewöhnlich hat man ihn aber in den Kreuzungspunkt der Richtungslinien (den ersten Knotenpunkt) verlegt, und wenn es sich um Fälle handelt, wo die beiden gesehenen Punkte nacheinander direkt gesehen werden, würde man ihn in den Drehpunkt des Augapfels legen müssen. Für sehr weit entfernte Punkte wird die Größe des Gesichtswinkels dadurch nicht verändert, für nahe aber allerdings.

Ich füge hier noch eine kleine Tafel bei, welche LISTING für sein schematisches Auge unter der Annahme berechnet hat, daß die Netzhaut in der zweiten Brennebene des Auges liege, und die Pupille 4 mm Durchmesser habe. Es sind darin angegeben unter l_1 die Entfernungen des leuchtenden Punktes von dem vorderen Brennpunkte nach vorn, unter l_2 die des Bildes von der Netzhaut nach hinten, unter z der Durchmesser des Zerstreuungskreises. Die Rechnung ist ausgeführt nach der Gleichung § 9 8c)

$$l_1 l_2 = F_1 F_2$$

und § 11 1a). Das Produkt $F_1 F_2$ ist für LISTINGs schematisches Auge gleich 301,26 Quadratmillimeter. (Als runde Zahl genügt 300.)

l_1	l_2	z
∞	0 mm	0 mm
65 Meter	0,005	0,0011
25	0,012	0,0027
12	0,025	0,0056
6	0,050	0,0112
3	0,100	0,0222
1,5	0,200	0,0443
0,75	0,40	0,0825
0,375	0,80	0,1616
0,188	1,60	0,3122
0,094	3,20	0,5768
0,088	3.42	0,6484

Man sieht aus dieser Tabelle auch, wie wenig sich die Lage des Bildchens ändert, wenn die sich ändernde Entfernung des Objekts noch sehr groß ist, und wie schnell das Bildchen sich von der Netzhaut entfernt, wenn das Objekt in geringerer Entfernung vom Auge sich mehr und mehr nähert.

Um zu ermitteln, für welche Entfernungen sich ein Auge akkommodieren kann, sind verschiedene Instrumente, Optometer, vorgeschlagen worden.

Die zuerst sich darbietende Methode, nach welcher wir im täglichen Leben Kurzsichtigkeit und Weitsichtigkeit zu unterscheiden pflegen, ist die, zu beobachten, in welcher Entfernung kleinere Gegenstände, z. B. Buchstaben, am besten gesehen werden. Indessen ist dabei keine große Genauigkeit der Angaben möglich. Einmal sind gedruckte Buchstaben nie so klein, um nicht auch bei ziemlich beträchtlichen Abweichungen der Akkommodation noch gelesen werden zu können. So kann ich eine Druckschrift, wie die vorliegende, in 13 Zoll Entfernung noch lesen, während mein Auge für seinen Fernpunkt, 3 Fuß Entfernung, akkommodiert ist. Und ebenso kann ich sie in 2.7 Zoll Entfernung lesen, obgleich ich das Auge nur auf 3.6 Zoll akkommodieren kann. Außerdem ist zu bemerken, daß die Gegenstände, wenn man sie dem Auge nähert, unter einem größeren Gesichtswinkel erscheinen, und deshalb unter übrigens gleichen Umständen deutlicher erkannt werden als in größerer Entfernung. Sehr kleine, schwer zu erkennende Gegenstände werden deshalb dem Auge zuweilen näher gebracht, als die Akkommodationsdistanz ist, weil man bei geringer Ungenauigkeit des Bildes und größerem Sehwinkel zuweilen mehr erkennt, als bei genauer Akkommodation und geringerem Sehwinkel. Will man also die Akkommodationsweiten auf diese Art ermitteln, so muß man für verschiedene Abstände verschiedene Gesichtsobjekte wählen, und alle so fein, daß sie in der betreffenden Entfernung von einem gut akkommodierten Auge nur eben noch erkannt werden können.

PORTERFIELD[1] hat zuerst den SCHEINERschen Versuch zur Untersuchung der Sehweiten empfohlen, und darauf ein Optometer gegründet, welches TH. YOUNG[2] verbesserte. Letzterer empfiehlt einen feinen weißen Faden auf dunklem Grunde auszuspannen, so daß sein eines Ende nahe unter dem Auge sich befindet, und dann durch einen Schirm mit zwei Löchern nach dem Faden zu sehen. Er erscheint dann nur an der Stelle, für welche das Auge akkommodiert ist, einfach, an allen übrigen Stellen doppelt. Die einfach erscheinende Stelle kann leicht bezeichnet werden. Ihre Entfernung vom Auge entspricht der beim Versuche stattfindenden Sehweite des Auges. Übrigens kann man auch andere feine Objekte benutzen, welche man in verschiedene Entfernung vom Auge bringt. Man muß die Objekte für diese Versuche so fein wählen, daß sie durch die Löcher des Schirms eben noch deutlich gesehen werden können, z. B. feine Nadeln auf hellem Grunde, oder feine Löcher und Spalten in dunklen Schirmen. Auch muß man darauf achten, daß man das Objekt durch beide Löcher gleichzeitig erblickt, sonst ist man Irrungen leicht ausgesetzt. Das Gesichtsfeld reduziert sich bei diesen Versuchen auf die verhältnismäßig breiten Zerstreuungsbilder der beiden Löcher des Schirms, welche zum Teil ineinander greifen müssen, wie Fig. 58 *a* und *b* darstellt. Nur in dem mittleren gemeinsamen Teile *c*, welcher zugleich am hellsten ist, können Doppelbilder erscheinen wie die Nadelspitzen *g*, nicht aber in den seitlichen Teilen, welche nur je einem Zerstreuungsbilde angehören. In den letzteren erscheinen die Bilder stets einfach, wie die Nadel *h*. Dieser Umstand macht für ungeübte Personen das Gelingen des Versuchs oft schwierig.

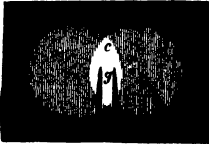


Fig. 58.

Eine ähnliche Methode, um die Akkommodationsdistanzen, namentlich den Fernpunkt zu bestimmen, schien mir in der Ausführung noch größere Genauigkeit zu geben als das Sehen durch zwei Löcher. Man läßt durch eine kleine Öffnung eines Schirms Licht des Himmels oder einer Kerzenflamme fallen. Solch ein kleiner Lichtpunkt erscheint einem Auge, welches nicht genau für ihn adaptiert ist, als ein fünf- oder sechsstrahliger Stern (s. unten § 14), während er bei passender Akkommodation als ein ziemlich gut begrenzter, wenn auch nicht ganz regelmäßig runder Lichtpunkt erscheint. Schiebt man nun einen Schirm von der Seite her vor die Pupille, so sieht man die Lichtfigur, welche der Punkt bildet, in der Regel von einer Seite her sich verdunkeln, und zwar von derselben Seite, wo der Schirm vorgeschoben wird, wenn das Objekt weiter entfernt ist, als die Akkommodationsdistanz beträgt; von der entgegengesetzten Seite dagegen, wenn es näher ist. Bei richtiger Akkommodation dagegen wird das Objekt entweder in allen seinen Teilen gleichzeitig dunkler, oder es wird in unregelmäßiger Weise verlöscht, so daß es z. B. oben und unten zu schwinden anfängt, während man den Schirm von einer Seite her vor die Pupille schiebt.

Ein anderes Mittel, die Sehweite zu bestimmen, welches namentlich für Ungeübte leichter ausführbar ist als der SCHEINERsche Versuch, ist von der Farbenzerstreuung im Auge hergenommen, und wird in § 13 beschrieben werden.

RUETES Optometer ist bestimmt, sich gegen absichtliche Täuschungen durch den Untersuchten zu sichern. Es ist ein kastenartiger Schirm, durch welchen eine Röhre geht. Der zu untersuchende Mensch blickt durch diese Röhre auf ein Buch, von dem er nur einige Worte sieht, und dessen Entfernung zu beurteilen er kein Mittel hat (als die Adaption des Auges selbst). Man hält ihm bald kleinere, bald größere Druckschrift in verschiedenen Entfernungen vor: bei beabsichtigter Täuschung wird er schwer vermeiden, sich in Widersprüche zu verwickeln.

HASNERS Optometer ist ein horizontales Brett auf Stativ, an einem Ende mit einer Maske für den oberen Teil des Gesichts versehen, um die Lage der Augen da-

[1] *On the eye.* Vol. I. p. 423. — *Edinb. medical Essays.* IV. 185.
[2] *Phil. Transactions.* 1801. P. I. p. 34.

durch zu fixieren. Auf dem Brette sind Teilungen angebracht, um die Entfernung von den Augen zu messen; es sind außerdem die Konvergenzwinkel der Augenachsen für die verschiedenen Punkte der Mittellinie darauf verzeichnet. Das Instrument ist dazu bestimmt, die verschiedenen Versuche über Akkommodationsdistanzen, über Einfachsehen und Doppeltsehen mit beiden Augen bequem ausführen zu lassen.

Künstliche Augen zur Erläuterung von Keplers Theorie des Sehens und der Wirkung der Brillen sind beschrieben worden von Haller[1], Huygens[2], Wolf[3], Adams[4] und Kries[5].

Kepler[6], welcher zuerst richtige Begriffe von der Brechung des Lichts im Auge hatte, sah auch die Notwendigkeit einer Akkommodation des Auges für verschiedene Entfernungen ein, und erklärte die bei unpassender Akkommodation auftretenden Zerstreuungskreise. Scheiner[7] beschrieb die Erscheinungen, welche bei unpassender Akkommodation eintreten, wenn man durch einen Schirm mit zwei Öffnungen sieht. Erklärungen dieses Versuchs gaben de la Hire[8], der aber dabei die Möglichkeit der Akkommodation für verschiedene Entfernungen leugnete, später J. de la Motte[9] und Porterfield[10], welcher letztere zugleich die irrigen, von de la Hire aus dem Versuche gezogenen Schlüsse berichtigte. Die scheinbaren Bewegungen eines außer der Sehweite liegenden Gegenstandes, wenn man ihn durch eine enge Öffnung erblickt und diese selbst bewegt, erwähnt Mile[11] zuerst, und beschrieb später H. Mayer[12] ausführlicher, mit Beziehung auf die Theorie der Akkommodation.

Eine ausführliche Darstellung des Entstehens der Zerstreuungskreise, ihres Übereinandergreifens usw. gab Jurin[13].

Was den Gebrauch der Brillengläser betrifft, so kommt bei Plinius[14] eine Stelle vor, welche darauf hinzudeuten scheint. Er berichtet, daß konkave Smaragde vorkämen, welche das Gesicht sammelten (*visum colligere*), und deshalb nicht geschnitten werden dürften. Der Kaiser Nero, welcher kurzsichtig war (Plinius I. II. c. 34), sah durch einen solchen Smaragd den Kämpfen der Gladiatoren zu. Später findet man wieder Nachrichten aus dem Anfange des 14. Jahrhunderts, wo die Brillen als eine neue Erfindung betrachtet wurden. Ein Florentiner Edelmann, Salvinus Armatus, gestorben 1317, wird in seiner Grabschrift als Erfinder der Brillen genannt[15]. Alexander de Spina, ein Mönch aus Pisa, gestorben 1313, soll ein Paar Brillen bei jemandem gesehen haben, der ein Geheimnis daraus machte, solche nachgemacht und an viele Leute verteilt haben[16]. Maurolycus (1494 bis 1575) versuchte später eine Erklärung der Wirkung zu geben, die aber entsprechend seiner Theorie vom Sehen unrichtig

---

[1] Elem. Physiolog. V. 469.
[2] Dioptrica Lugduni 1704. p. 112.
[3] Nützliche Versuche. III. 481.
[4] *Essay on vision.* London 1792.
[5] Übersetzung des vorigen. Gotha 1794.
[6] Paralipomena. p. 200.
[7] Oculus. p. 37 u. 41. Ähnliche Versuche p. 32 u. 49.
[8] *Journal des Sçavans.* 1685 und in *Accidens de la vue.* 1693.
[9] Versuche und Abhandl. der Gesellschaft in Danzig. Bd. II. S. 290.
[10] *On the eye.* Vol. I. Book 3. Chapt. 3.
[11] Poggendorffs Ann. XLII. 40.
[12] Prager Vierteljahrsschrift. 1851. Bd. IV. S. 92.
[13] *Essay on distinct and indistinct vision.* Smiths *Optics.* Cambridge 1738.
[14] L. XXXVII. c. 5.
[15] Volkmanns Nachrichten von Italien. Bd. I. S. 542. Die Grabschrift in der Kirche Maria maggiore zu Florenz wurde später weggenommen und hieß:

Qui giace Salvino degli Armati
Inventore degli Occhiali.
Dio gli perdoni le peccata.

[16] Smiths *Optics.* *Remarks* p. 12.

war. Er läßt nämlich die Sehestrahlen, d. h. Strahlen, von denen je einer von je einem Punkte des Objekts ausgeht. durch die Gläser konvergenter oder divergenter werden, so wie es in der Tat nur mit den von einem einzigen Punkte ausgegangenen Lichtstrahlen der Fall ist. Erst KEPLER[1] gab die vollständige und richtige Theorie von dem Nutzen der Brillen.

Literatur.

1575. FR. MAUROLYCUS, De lumine et umbra. Lib. III.
1583. J. B. PORTA, De refractione. Lib. VIII.
1604. J. KEPLER, Paralipomena ad Vitellionem. p. 200.
1619. SCHEINER, Oculus. p. 32—49.
1685. DE LA HIRE, *Journal des Sçavans.* Ann. 1685. — *Accidens de la vue* 1693. § II. (Folgerungen aus dem SCHEINERschen Versuch.)
1709. DE LA HIRE, *Mém. de l'Acad. de Paris.* An. 1709. p. 95 (Sehen im Wasser).
.... DE LA MOTTE, Versuche und Abhandlungen der Gesellschaft in Danzig. Bd. II. S. 290. (Theorie des SCHEINERschen Versuchs.)
1738. JURIN, *Essay on distinct and indistinct vision* in SMITH, *System of optics.* Cambridge 1738.
1759. PORTERFIELD, *On the eye.* p. 389—423*. (Theorie des SCHEINERschen Versuchs.)
1792. G. ADAMS, *An essay on vision.* London. 2d. edition, übersetzt von F. KRIES. Gotha 1794. (Ausführlich über Brillen.)
1800. J. BISCHOFF, Praktische Abhandlung der Dioptrik. Stuttgart. 2. Aufl. (Über Brillen.)
1801. TH. YOUNG, *Philos. Transact.* P. I. p. 34. (Optometer.)
1810. GILBERT in seinen Annalen d. Physik. XXXIV. 34 u. XXXVI. 375. (Sehen im Wasser.)
.... WOLLASTON, *Improved periscopic spectacles. Phil. Mag.* XVII. NICHOLSONS *Journal.* VII. 143. 241.
.... JONES *on* WOLLASTONS *spectacles.* NICHOLSONS *Journal.* VII. 1902 u. VIII. 38.
1821. G. TAUBER, Anweisung für auswärtige Personen, wie dieselben aus dem optisch-okulistischen Institute zu Leipzig Augengläser bekommen können. Leipzig. 3 Aufl.
1824. MUNCKE, Über Sehen unter Wasser. POGGENDORFFS Ann. II. 257. GEHLERS physik. Wörterbuch, neu bearb. Leipzig 1828. Art. Gesicht. S. 1383—1386*. Über Brillen, ebenda 1403—1410*.
1825. PURKINJE, Zur Physiologie der Sinne. II. S. 128*.
1830. HOLKE, Disquisitio de acie oculi dextri et sinistri in mille ducentis hominibus. Lipsiae.
1837. J. MILE in POGGENDORFFS Ann. XLII. S. 51*.
1840. HENLE in J. MÜLLERS Lehrbuch der Physiologie. Bd. II. S. 339—341*.
1845. O. YOUNGS *optometer. Phil. Mag.* XXVI. 436.
1850. J. CZERMAK, Verhandl. d. Würzburger physik. Gesellschaft. Bd. I. S. 184.
1851. PEYTAL, *Nouvel instrument à l'usage de la vue myope. Institut.* No. 841. p. 53. No. 857. p. 180.
H. MAYER, Prager Vierteljahrsschrift für prakt. Heilkunde. XXXII. S. 92*.
v. HASNER, ebenda. S. 166. (Optometer.)
1852. TH. RUETE, Der Augenspiegel und das Optometer. Göttingen. S. 28*.
1854. JO. CZERMAK, Wiener Sitzungsberichte. Bd. XII. S. 322*.

Nachtrag.

Die Lehre von den individuellen Verschiedenheiten des Refraktionszustands der Augen ist namentlich durch die wichtigen Arbeiten von DONDERS vollständig aufgehellt worden und hat denn auch schon die fruchtbarste Anwendung in der Augenheilkunde gefunden, nicht bloß direkt für die Verbesserung mangelhaften Akkommodationsvermögens durch Brillen, sondern auch indirekt, indem eine Reihe bisher dunkler Krankheitszustände sich als Folge mangelhafter Refraktion und Akkommodation des Auges ergaben.

---

[1] Paralipomena. p. 200.

Der Fortschritt, den DONDERS gemacht hat, hängt namentlich davon ab, daß er getrennt hat die Erscheinungen, welche einem abnormen Refraktionsgrade im Ruhezustande des Auges angehören bei der Akkommodation für die Ferne, von denen, welche sich auf die größere oder geringere Breite der Akkommodation beziehen und die also in einer Änderung des Refraktionszustandes durch Muskeltätigkeit bestehen.

Für die Ansicht, daß der Zustand des Fernsehens der Ruhezustand des Auges sei, für welche schon die subjektive Empfindung sehr entschieden spricht und die auch meiner oben gegebenen Darstellung zugrunde liegt, führt DONDERS noch weiter an, daß durch gewisse narkotische Stoffe (namentlich Atropin, das Alkaloid der Belladonna) eine Lähmung des Ringmuskels der Pupille und der Akkommodation hervorgebracht wird, wobei das Auge für seinen Fernpunkt eingerichtet ist, ohne diesen Refraktionszustand ändern zu können. Sollte ein muskulöser Apparat da sein, dessen Kontraktion die Akkommodation für die Ferne verstärken könnte, so müßte man die sehr unwahrscheinliche Annahme machen, daß dieser durch das Atropin nicht gelähmt, sondern in eine dauernde krampfhafte Zusammenziehung gebracht würde.

Daneben lehren pathologische Beobachtungen, daß wenn durch Lähmung des *Nervus oculomotorius* der Akkommodationsapparat gelähmt wird, das Auge sich stets auf seinen früheren Fernpunkt dauernd einstellt. Dagegen sind durchaus keine Fälle von Bewegungslähmungen des Auges beobachtet worden, wobei der Fernpunkt sich genähert hätte.

Die größte Sehweite entspricht also dem Ruhezustande des Auges. Als normale Lage des Fernpunktes kann die in unendlicher Ferne betrachtet werden. Solche Augen nennt DONDERS emmetropisch (von ἔμμετρος, *modum tenens* und ὤψ, *oculus*), um die Vieldeutigkeit des Ausdrucks „normale“ oder „normalsichtige“ Augen zu vermeiden. Emmetropische Augen können natürlich noch an mancherlei anderen Fehlern leiden und brauchen nicht „normal“ zu sein.

Augen, deren Fernpunkt vor ihnen, aber nicht in unendlicher Ferne liegt, nennt er brachymetropisch oder, mit dem älteren Namen, myopisch; diese Augen können nur divergierend einfallende Strahlenbündel auf der Netzhaut vereinigen.

Augen, die im Gegenteil nicht nur parallele, sondern auch konvergierend einfallende Strahlen vereinigen können, heißen hypermetropisch.

Die myopischen Augen können sich ohne Hilfe eines Brillenglases für weit entfernte Objekte nicht einstellen; es mangelt ihnen also ein wichtiger Teil der Fähigkeit eines emmetropischen Auges. Die hypermetropischen dagegen sind genötigt jedesmal, wo sie ein reelles Objekt fixieren wollen, eine Akkommodationsanstrengung zu machen, wodurch mannigfache und häufig sehr störende Ermüdungserscheinungen herbeigeführt werden. Beiderlei Arten der Abweichung sind also für den praktischen Gebrauch des Auges nachteilig und werden deshalb von DONDERS unter dem Namen der ametropischen Augen zusammengefaßt.

Der Grund dieser Abweichungen beruht der Regel nach auf der verschiedenen Länge der Augenachsen, die in den hypermetropischen kürzer ist, als in den emmetropischen. Damit hängt auch die Lage des Drehpunkts dieser Augen zusammen, der in den myopischen Augen weiter nach hinten, in den hypermetropischen weiter nach vorn liegt. Die Hornhaut und Linse zeigen in der Regel keine Krümmungsänderungen, aus denen die Ametropie erklärt werden könnte.

Um den Zustand solcher abweichender Augen vollständig zu bestimmen, muß ferner die Größe der Veränderung bestimmt werden, welche durch aktive Muskelanstrengung in ihrem Brechungszustande hervorgebracht werden kann. Wenn wir ein emmetropisches Auge, welches zwischen unendlicher Ferne und einer Sehweite von 6 Zoll sich für jedes Objekt einstellen kann, und ein stark myopisches, welches zwischen 6 und 3 Zoll Entfernung akkommodieren kann, miteinander vergleichen, so scheint auf den ersten Anblick vielleicht das letztere eine viel engere Grenze der Akkommodationsfähigkeit zu haben, als das erstere. Wenn wir aber dicht vor ein solches myopisches Auge eine Konkavlinse von 6 Zoll Brennweite setzen, welche ihm erlaubt unendlich entfernte Gegenstände deutlich zu sehen, so werden wir finden, daß dasselbe Auge mit Hilfe dieser Brille nun auch, wie das zuerst genannte emmetropische Auge zwischen unendlicher Ferne und 6 Zoll Abstand akkommodieren kann, also eine ebenso große Breite der Akkommodation hat, wie das erstere. Die genannte Linse mit 6 Zoll negativer Brennweite entwirft nämlich von Objekten, die 6 Zoll hinter ihr liegen, ein virtuelles Bild in 3 Zoll Entfernung, für welches sich also das supponierte myopische Auge akkommodieren kann.

Wir können also die Akkommodationsbreite zweier verschieden fernsichtiger Augen nicht unmittelbar nach dem Abstand ihres Fernpunkts vom Nahpunkte miteinander vergleichen, sondern wir müssen sie durch eine vorgesetzte Linse erst auf gleichen Refraktionszustand gebracht denken, um sie vergleichen zu können.

Soll eine solche Linse die Objekte nicht vergrößern oder verkleinern, so muß ihr zweiter Knotenpunkt mit dem ersten des Auges zusammenfallen (was sich praktisch, wenn es der Mühe wert erscheinen sollte, bei dicken konvex-konkaven Linsen erreichen lassen würde; vergleiche Seite 69 und 70). Nennen wir die Entfernung des Fernpunktes eines gegebenen Auges vom ersten Knotenpunkte F, die des Nahepunktes N, und A die Entfernung des nächsten Punktes, für den das mit einer Linse von der negativen Brennweite F versehene Auge sich noch akkommodieren kann, so ist

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{N} - \frac{1}{F}$$

und die Größe $\frac{1}{A}$ wird von Donders als Maß der Akkommodationsbreite benutzt.

Die Einheit dieses Akkommodationsmaßes ist also Eins dividiert durch das Längenmaß, wozu bisher, den Brillennummern entsprechend, entweder Pariser oder Preußische Zoll gewählt sind. Man könnte sich vielleicht erlauben, eine solche Einheit ein Zolltel zu nennen, wenn Verwechselungen verschiedener Längenmaße zu fürchten wären.

So haben also gleiche Akkommodationsbreite von ein Sechstel 1. ein emmetropisches Auge, dessen Sehweite von 6 Zoll bis Unendlich geht, 2. ein myopisches, dessen Sehweite von 3 bis 6 Zoll geht, 3. ein hypermetropisches, dessen Sehweite von + 12 bis — 12 Zoll geht, da

$$\frac{1}{6} - \frac{1}{\infty} = \frac{1}{3} - \frac{1}{6} = \frac{1}{12} - \left(-\frac{1}{12}\right) = \frac{1}{6}.$$

Die Größe der Akkommodation $\frac{1}{A}$ nimmt mit zunehmendem Lebensalter kontinuierlich ab, und zwar bei ganz oder nahehin emmetropischen Augen annähernd proportional den Jahren, so daß sie im zehnten Jahre im Mittel

$^3/_8$ Zolltel beträgt, im 65. Jahre Null wird. Verlust der Akkommodationsfähigkeit findet also im höheren Lebensalter regelmäßig statt, und auf diesen Zustand hat DONDERS den Namen der Presbyopie beschränkt. Dabei ist aber noch zu bemerken, daß im höheren Alter, etwa vom 50. Jahre ab, auch der Fernpunkt des Auges etwas hinausrückt, früher emmetropische Augen also hypermetropisch, schwach myopische emmetropisch werden.

Die allmähliche Verminderung der Akkommodationsbreite hängt wahrscheinlich davon ab, daß die Festigkeit der äußeren Schichten der Kristallinse wächst und die Linse deshalb weniger nachgiebig wird. Vermehrung des Brechungskoeffizienten ihrer äußeren Schichten muß nach Seite 83 auch eine Verminderung der Brechung in der Linse zur Folge haben und also den hintern Brennpunkt des Auges nach hinten rücken lassen.

Zu erwähnen ist noch, daß wir der Regel nach immer Konvergenz- und Akkommodationsanstrengung gleichzeitig vollführen und daher auch unwillkürlich eine bestimmte Verbindung zwischen beiden Anstrengungen einhalten. Jemand, der seine Akkommodation nicht willkürlich beherrschen gelernt hat, akkommodiert deshalb besser für die Ferne bei parallelen Gesichtslinien und erreicht die stärkste Anstrengung der Akkommodation besser bei stark konvergenten Gesichtslinien.

DONDERS unterscheidet daher 1. die absolute Akkommodationsbreite, wo der Fernpunkt genommen wird bei parallelen (oder selbst divergenten) Blicklinien, der Nähepunkt bei möglichst stark konvergenten. Der Nahepunkt der Akkommodation liegt hierbei ferner als der Konvergenzpunkt. Es ist dies die größte erreichbare Akkommodationsbreite, sie betrug bei einem emmetropischen Beobachter im Alter von 15 Jahren $\frac{1}{3,69}$.

2. Die binokulare Akkommodationsbreite. Die Konvergenz wird hierbei nicht stärker gemacht, als zur Fixierung des Punktes, für den man akkommodiert, nötig ist. Man erreicht hierbei nicht ganz denselben Grad der Akkommodation, wie im ersten Falle. Die Breite der binokularen Akkommodation desselben Beobachters war $\frac{1}{3,9}$.

3. Die relative Akkommodationsbreite für einen gegebenen Grad der Konvergenz. Dieser war für denselben Beobachter bei parallelen Gesichtslinien nur gleich $\frac{1}{11}$, erreichte bei einer Konvergenz von 11^0 ihr Maximum von $\frac{1}{5,76}$, blieb dann bei steigender Konvergenz ziemlich unverändert, so daß sie bei 23^0 noch $\frac{1}{6,4}$ betrug, und bei der Stellung des binokularen Nahpunkts, bei 38^0 Konvergenz, $\frac{1}{9}$. In der Stellung des absoluten Nahpunkts, bei 73^0 Konvergenz, war sie Null.

Für ärztliche Zwecke müssen also bestimmte Grade der Konvergenz gewählt werden, um vergleichbare Grade der Akkommodation zu erhalten, und man muß mit passend gewählten Linsen, die man vor das Auge setzt, dem Patienten die Akkommodation bei einem solchen Konvergenzgrade möglich zu machen suchen.

Für die Bestimmung des Fernpunkts empfiehlt sich die parallele Richtung der Gesichtslinien auf ein entferntes Objekt; die Brennweite der schwächsten

konkaven Linsen, welche einem myopischen, oder der stärksten konvexen Linsen, welche einem hypermetropischen Auge noch vollkommen genaues Sehen sehr entfernter Objekte gestatten, ist unmittelbar gleich der Entfernung des Fernpunktes vom Auge. Für die Bestimmung des Nahpunktes schreibt Donders vor, ihn durch passende Konvexgläser stets bis auf etwa 8 Zoll heranzubringen, wenn er weiter abliegen sollte, um einer genügenden Akkommodationsanstrengung sicher zu sein. Dabei muß dann natürlich der Einfluß der Linse auf die Lage des gesehenen Bildes in Rechnung gebracht werden.

Als Probeobjekte zur Prüfung der Sehweite ungeübter Beobachter dienen Buchstaben und Ziffern verschiedener Größe.[1]

Im ganzen ist es ratsam bei Augen, deren Sehweite für die gewählte Beschäftigung nicht genügt, rechtzeitige Unterstützung durch passende Brillen anzuwenden. Presbyopische Augen brauchen eine Konvexbrille beim Lesen und Schreiben, überhaupt bei der Beschäftigung mit nahen Objekten, um die Zerstreuungskreise zu vermindern. Des Abends und bei schwacher Beleuchtung, wenn die Pupille weit ist und deshalb die Zerstreuungskreise größer, ist eine stärkere Brille notwendig als bei Tage und bei stärkerer Beleuchtung. In der Regel genügt eine Brille, welche den Nahepunkt auf 10 bis 12 Zoll heranbringt; nur bei sehr alten Leuten, zwischen 70 und 80 Jahren, wo die Gesichtsschärfe sich beträchtlich vermindert, ist es wünschenswert, die Objekte bis auf 8 oder 7 Zoll heranbringen zu können, um sie unter größerem Gesichtswinkel zu sehen.

Bei myopischen Augen ist namentlich darauf zu sehen, daß bei der Beschäftigung mit nahen Gegenständen gebückte Haltung des Kopfes und starke Konvergenz der Augen vermieden wird, weil die Verdünnung, Ausbauchung und Zerrung der Membranen im hinteren Teile des Auges durch gesteigerten Blut- und Muskeldruck schnell wächst und die höheren Grade der Myopie das Sehvermögen sehr erheblich beeinträchtigen und gefährden. Bei den schwächeren Graden von Kurzsichtigkeit, wobei der Fernpunkt über 5 Zoll vom Auge liegt, ist es im allgemeinen zulässig konkave Brillengläser anzuwenden und fortdauernd zu tragen, welche den Fernpunkt in unendliche Ferne rücken. Das myopische Auge wird dadurch einem emmetropischen ähnlich gemacht. Dabei ist aber sehr sorgfältig darauf zu achten, daß Bücher, Papierblätter, auf denen geschrieben wird, und Handarbeiten nicht näher als 12 Zoll den Augen genähert werden. Bei übrigens guter Beschaffenheit des Auges ist in dieser Entfernung ohne Schwierigkeit möglich zu lesen und zu schreiben. Zwingen die Umstände gebieterisch zu feinerer Arbeit, die den Augen näher gebracht werden muß, so ist der Gebrauch schwächerer Konkavgläser und vielleicht achromatisierter prismatischer Gläser, die auf der Nasenseite dicker als auf der Schläfenseite sind, ratsam, weil dann die sehr genäherten Objekte mit geringerer Konvergenz und geringerer Anstrengung der Akkommodation gesehen werden können.

Gläser, welche die Myopie vollkommen neutralisieren, können zuweilen bei solchen Kurzsichtigen, die noch nie Brillen getragen haben, erst nach einiger Gewöhnung an schwächere Gläser, statt deren man nach und nach schärfere

[1] Dergleichen sind herausgegeben von Jaeger jun.: Schriftskalen, Wien 1857; und Snellen, *Test types for the determination of the acuteness of vision:* London. Williams and Norgate; Paris, Germer Baillière; Berlin, Peters; Utrecht, Greven. Die letzteren sind in regelmäßiger Abstufung der Größe ausgeführt und mit Nummern versehen, welche die Zahl der Pariser Fuße angeben, um welche entfernt ein normales Auge die Buchstaben noch lesen kann. Ähnliche auch von Giraud Teulon. Paris, Nachet.

substituiert, angewendet werden, weil die Verbindung zwischen Akkommodation und Konvergenz den neuen Umständen allmählich angepaßt werden muß. Bei geringerer Akkommodationsbreite oder merklich verminderter Gesichtsschärfe ist es überhaupt ratsamer, für nahe Objekte schwächere Brillen zu tragen, die für die gewöhnlichen Beschäftigungen genügen, und für ferne Objekte eine Lorgnette zu Hilfe zu nehmen.

Bei höheren Graden von Myopie ist das Auge überhaupt schon leidend und gefährdet; es sind dann mancherlei andere Rücksichten noch zu nehmen, die hier nicht weiter erörtert werden können, und der Rat eines intelligenten Arztes jedenfalls notwendig. Überhaupt ist die Gleichgültigkeit, womit die meisten Kurzsichtigen den Zustand ihrer Augen betrachten, die Ursache späterer Entwicklung gefährlicher Augenkrankheiten und vieler Erblindungen, und es kann nicht genug vor Nachlässigkeit in dieser Hinsicht gewarnt werden.

Hypermetropische Augen brauchen konvexe Linsen, und zwar wähle man im Anfang, wo sie ihre fortdauernde Akkommodationsanstrengung noch nicht ganz zu beseitigen wissen, etwas zu starke Gläser, durch die sie schon ferne Objekte nicht mehr ganz deutlich sehen können. Je mehr sie sich der Akkommodationsanstrengung entwöhnen, desto stärkere Gläser werden nötig. Bei verminderter Akkommodationsbreite brauchen sie stärkere Konvexgläser für die Nähe, schwächere für die Ferne. Die sehr bedeutenden Beschwerden der fortdauernden Akkommodationsanstrengung werden durch passende Gläser ganz beseitigt, und es ist einer der bedeutendsten praktischen Triumphe der neueren Ophthalmologie, daß die äußerst hartnäckige Asthenopie, die auf Hypermetropie beruht und die die Verzweiflung der Patienten und Ärzte war, nachdem ihr Grund erkannt worden ist, durch ein so einfaches Mittel so leicht beseitigt werden kann.

1855. Stellwag v. Carion, Die Akkommodationsfehler des Auges. Wiener Sitzungsber. XVI, 187.

— Czermak. Akkommodationslinien. Ebenda. XV, 425, 457.

1856. A. v. Graefe, Über *Myopia in distans* nebst Betrachtungen über das Sehen jenseits der Grenzen unserer Akkommodation. Archiv für Ophthalmol. II, 1, p. 158—186.

1857. J. J. Oppel, Über das Sehen durch kleine Öffnungen und das Gerhamsche Diaskop. Jahresber. d. Frankfurter Vereins. 1856—1857. p. 37—42.

1858. F. C. Donders, Winke betreffend den Gebrauch und die Wahl der Brillen. Archiv für Ophthalmol. IV, 1, 286—300.

1859. M. Mac-Gillavry, Onderzoekingen over de hoegrootheid der accommodatie. Dissertat. Utrecht 1858. Henle u. Pfeufer. Zeitschrift für ration. Medicin. (3) VI, 612—613.

1860. F. C. Donders, Beiträge zur Kenntnis der Refraktions- und Akkommodationsanomalien. Archiv für Ophthalmol. VI, 1. S. 62—105. VI, 2. S. 210—283. VII, 1. p. 155—204. Verslagen en Mededeelingen der K. Acad. Amsterdam 1861. p. 159—201. Jaarlijksch Verslag betrekkelijk het Nederlandsch Gasthuis voor Ooglijders. I, 63—205. II, 25—68. IV, 1—118.

— C. Landsberg, Beschreibung eines neuen Optometers und Ophthalmodiastometers. Poggendorffs Ann. CX, 435—452. Polytechn. Zentralbl. 1860. p. 405—406.

— A. Burow, Über den Einfluß peripherischer Netzhautpartien auf die Regelung der akkommodativen Bewegungen des Auges. Archiv für Ophthalm. VI, 1, 106—110.

1861. Ch. Aeby, Die Akkommodationsgeschwindigkeit des menschlichen Auges. Henle u. Pfeufer. Zeitschrift. (3) XI, 300—304.

— Giraud Teulon, *Des mouvements de décentration latérale de l'appareil cristallin. C. R.* LII, 383—385. *Inst.* 1861. p. 82. *Cosmos.* XVIII, 284—286.

— H. Dor, *Des différences individuelles de la réfraction de l'oeil. J. d. la physiologie.* XI, XII. *Arch. d. sciences phys.* (2) X, 82—85.

1861. H. DE BRIEDER, De stoornissen der accommodatie van het oog. Dissertat. Utrecht. — Jaarlijksch Verslag betr. het Niederl. Gasthuis. II, 69—142.
— v. JAEGER jun., Über die Einstellungen des dioptrischen Apparats im menschlichen Auge. Wien 1861.
— STELLWAG V. CARION, Zur Literatur der Refraktions- und Akkommodationsanomalien. Zeitschr. d. K. K. Ges. d. Ärzte. 1861.
1862. DE HAAS, Geschiedkundig onderzoek omtrent de Hypermetropia en hare gevolgen. Dissert. Utrecht. — Jaarlijksch Verslag betr. het Nederl. Gasthuis III, 157—208.
1863. A. BUROW, Vorläufige Notiz über die Konstruktion eines neuen Optometers. Archiv für Ophthalmol. IX, 2, 228—231.
— Derselbe, Ein neues Optometer. Berlin. 1863.
— Derselbe, Über die Reihenfolge der Brillenbrennweiten. Berlin. 1864.
— A. v. GRAEFE, Ein Optometer. Deutsche Klinik. 1863. S. 10.
1864. F. C. DONDERS, *On the anomalies of accommodation and refraction of the eye.* London. p. 1—635.
1865. E. JAVAL, *Une nouvelle règle à calcul. Ann. d'ocul.* Bruxelles. LIII, 181.
1866. J. W. VERSCHOOR, Optometers en Optometrie. Zesde Jaarlijksch Verslag van het Nederl. Gasthuis voor Ooglijders. p. 97—160.

§ 12. Mechanismus der Akkommodation.*

Die Veränderungen, welche man bei Akkommodationsänderungen am Auge eines anderen beobachten kann, sind folgende:

1. Die Pupille verengert sich bei der Akkommodation für die Nähe, erweitert sich bei der für die Ferne. Diese Veränderung ist leicht zu beobachten, und am längsten bekannt. Man bemerkt sie an jedem Auge, welches man abwechselnd einen nahen und einen in derselben Richtung fern liegenden Gegenstand betrachten läßt. Man hat nur darauf zu achten, daß die Pupille nicht durch zu starkes einfallendes Licht dauernd sehr verengt wird.

2. Der Pupillarrand der Iris und die Mitte der vorderen Linsenfläche verschieben sich bei eintretender Akkommodation für die Nähe etwas nach vorn. Um dies zu beobachten, wähle man einen scharf bestimmten fernen Fixationspunkt, und stelle als näheren eine Nadelspitze hin. Der Beobachtete bedeckt das eine Auge, und bringt das andere in eine solche Stellung, daß die Nadelspitze ihm den ferneren Fixationspunkt genau deckt. Er muß darauf achten, daß sein Auge diese Stellung nicht verläßt, und darf es auch nicht auf seitlich liegende Gegenstände abschweifen lassen, weil es bei diesem Versuche wesentlich darauf ankommt, daß die Richtung des Auges nicht verändert wird. Der Beobachter stellt sich so, daß er die Hornhaut des beobachteten Auges von der Seite und etwas von hinten sieht, und daß er die schwarze Pupille dieses Auges etwa noch zur Hälfte vor dem Hornhautrande der Sclerotica hervorragen sieht, so lange das beobachtete Auge in die Ferne sieht. Nun lasse er den näheren Gesichtspunkt, die Nadelspitze, fixieren; sogleich wird er bemerken, daß das schwarze Oval der Pupille und auch wohl ein Teil des ihm



Fig. 59.

* Vergl. Kap. 4 der nach dem ersten Abschnitte folgenden Zusätze! G.

zugekehrten Irisrandes vor der Sclerotica sichtbar werden. Fig. 59 *a* stellt dar, wie das fernsehende Auge hierbei erscheint, Fig. 59 *b* das nahesehende. Die Veränderung in der Stellung des schwarzen Flecks wird am auffallendsten, wenn man auf die Breite des hellen Zwischenraums zwischen ihm und einem am vorderen Rande der Hornhaut erscheinenden dunkleren Streifen $c_1 c_2$ achtet. Dieser Streifen ist das durch die Brechung in der Hornhaut verzerrte Bild des über die Iris hervorragenden jenseitigen Randes der Sclerotica, der an seiner inneren Seite gewöhnlich beschattet ist, und daher dunkler als die von vorn erleuchtete Iris erscheint. Wenn die Akkommodation für die Nähe eintritt, sieht man den Zwischenraum zwischen diesem Streifen $c_1 c_2$ und der dunklen Pupille schmaler werden. Verschöbe sich der Pupillarrand nicht nach vorn, so müßte beim Nahesehen dieser Zwischenraum umgekehrt breiter werden, weil sich die Pupille von allen Seiten gleichmäßig verengert, und ebenso würde er breiter werden, wenn das Hervortreten der Pupille durch eine zufällige Wendung des beobachteten Auges gegen den Beobachter hin entstände. Indem man also auf den genannten Streifen achtet, kann man sich vor jeder Täuschung sichern. Daß die vordere Linsenfläche stets dicht hinter der Pupille bleibt, ist in § 3 erwiesen.

3. Die vordere Fläche der Kristallinse wird gewölbter beim Nahesehen, flacher beim Sehen in die Ferne. Man kann sich davon durch das an der vorderen Fläche der Linse zurückgeworfene Licht überzeugen. Man gebe, wie beim vorigen Versuche, dem beobachteten Auge wieder zwei scharf bestimmte, in einer Linie vor ihm liegende Gesichtspunkte. Das Zimmer muß vollständig verdunkelt sein,

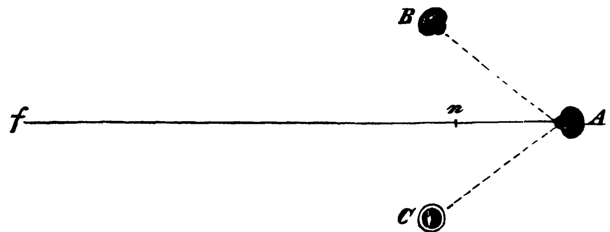


Fig. 60.

und außer einer großen und hellen Lampenflamme, welche man seitwärts von der Gesichtslinie in gleicher Höhe mit dem Auge aufstellt, darf sich kein größerer heller Gegenstand vor dem beobachteten Auge befinden, um alle störenden Hornhautreflexe zu vermeiden. In Fig. 60 sei *A* das beobachtete Auge. *C* die Flamme im Grundrisse, *n* der nähere, *f* der fernere Gesichtspunkt. Der Beobachter muß nun sein Auge in gleicher Höhe mit dem beobachteten Auge und der Lampe anbringen, so daß der Winkel *BAf* ungefähr gleich *CAf* ist, und so lange sein Auge in der Nähe von *B* hin und her bewegen, bis er die Reflexe von beiden Linsenflächen sieht. Diese beiden Reflexe Fig. 61 *b* und *c* sind sehr viel lichtschwächer als der Reflex der Hornhaut *a*. Der von der vorderen Linsenfläche *b* bildet ein aufrechtstehendes Bildchen der Flamme, etwas größer als das von der Hornhaut entworfene, aber meist so verwaschen, daß man die Gestalt der Flamme nicht genau erkennen kann. Sein scheinbarer Ort ist weit (8 bis 12 mm) hinter der Pupille. Es verschwindet daher auch schon bei leichten Bewegungen des beobachtenden Auges oder des Lichts hinter dem Irisrande. Wir wollen es das erste Linsenbild nennen, das von der hinteren Fläche entworfene dagegen das zweite. Dieses letztere Fig. 61 *c* ist umgekehrt und viel kleiner als das Hornhautbild und das erste Linsenbild, erscheint daher als ein helles, ziemlich gut begrenztes Pünktchen. Sein scheinbarer Ort ist nahe hinter der Fläche der Pupille, etwa 1 mm von ihr

entfernt; es verschiebt sich daher verhältnismäßig wenig gegen die Pupille und das Hornhautbild, wenn der Beobachter die Stellung seines Kopfes ändert.

Wenn das beobachtete Auge sich für die Nähe akkommodiert, wird das erste Linsenbild beträchtlich kleiner, und nähert sich in der Regel auch der Mitte der Pupille. Die Verkleinerung des Bildes bemerkt man am besten, wenn man statt einer Flamme einen Schirm mit zwei senkrecht übereinander stehenden Öffnungen angewendet hat, durch deren jede eine Flamme ihr Licht wirft, oder wenn man etwas unterhalb der einen Flamme einen horizontalen Spiegel anbringt, in dem sich die Flamme spiegelt. Das Spiegelbild der Flamme vertritt dann die zweite Flamme. Jedes der reflektierten Bilder besteht dann aus zwei lichten Stellen, und man sieht leicht und deutlich, wie die der vorderen Linsenfläche angehörigen sich einander nähern, wenn das Auge in die Nähe, auseinandertreten, wenn es in die Ferne sieht. In Fig. 62 stellt A die Reflexe beim Fernsehen, B beim Nahesehen dar; a ist der Reflex an der Hornhaut, b an der vorderen, c an der hinteren Linsenfläche. Als Lichtquelle sind zwei Flammen angenommen, welche durch rechtwinkelige Ausschnitte eines Schirms Licht senden.

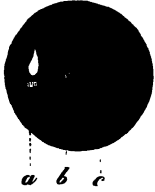


Fig. 61.

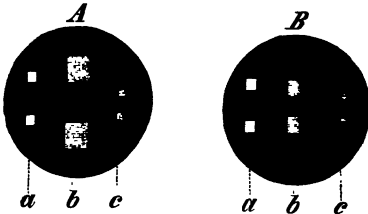


Fig. 62.

Da nun ein konvexer Spiegel unter übrigens gleichen Umständen desto kleinere Bilder entwirft, je kleiner sein Radius, so folgt aus dieser Beobachtung, daß die vordere Fläche der Kristallinse bei der Akkommodation für die Nähe sich stärker wölbt. Allerdings würde eine sehr geringe Verkleinerung des Spiegelbildchens auch wegen der Brechung der Strahlen in der Hornhaut entstehen, wenn die vordere Fläche der Kristallinse sich nur der Hornhaut näherte, ohne ihre Wölbung zu verändern. Doch ergibt die Rechnung, daß die Verkleinerung des Bildchens aus dieser Ursache äußerst unbedeutend sein würde im Vergleich zu der wirklich beobachteten.

4. Auch das Spiegelbildchen, welches die hintere Fläche der Kristallinse entwirft, wird bei der Akkommodation für die Nähe etwas kleiner. Um dies zu konstatieren, muß man genauere Beobachtungsmethoden anwenden, welche im Anhange dieses Paragraphen beschrieben werden sollen. Durch ebensolche Methoden findet man, daß der scheinbare (durch Linse und Hornhaut gesehene) Ort der hinteren Linsenfläche sich nicht merklich verändert. Da der scheinbare Ort der hinteren Linsenfläche sich nur sehr wenig von ihrem wirklichen Orte unterscheidet, und die Veränderungen der Kardinalpunkte des Auges bei Akkommodationsänderungen, wie unten gezeigt werden wird, derart sind, daß sie einen sich wenigstens teilweise gegenseitig aufhebenden Einfluß auf diesen scheinbaren Ort ausüben würden, können wir annehmen, daß der wahre Ort der hinteren Linsenfläche bei der Akkommodation sich nicht merklich ändert. Auch auf die Größe des Spiegelbildchens der hinteren Linsenfläche üben die Veränderungen der Kardinalpunkte einen teilweise entgegengesetzten Erfolg aus. Doch läßt sich zeigen, daß auch bei den günstigsten Annahmen, welche für die Veränderungen der optischen Konstanten möglicherweise gemacht werden können, um die Verkleinerung des Bildchens beim Nahesehen zu erklären, die Verklei-

nerung nicht ganz so groß ausfallen könnte, als sie wirklich beobachtet wird. Daraus kann also geschlossen werden, daß jedenfalls auch die hintere Linsenfläche beim Nahesehen sich stärker wölbt, aber nur in geringem Grade.

Da somit den Beobachtungen nach die vordere Fläche der Linse vorrückt, die hintere ihren Ort nicht verläßt, wird die Linse beim Nahesehen in der Mitte dicker. Da sie andererseits ihr Volumen nicht verändern kann, müssen wir daraus schließen, daß sich die Durchmesser ihrer Äquatorialebene verkürzen. In dem Querschnitte des vorderen Teils des menschlichen Auges Fig. 63 habe ich Hornhaut und Linse nach den Maßen eines der von mir untersuchten lebenden Augen in fünfmaliger Vergrößerung konstruiert, und zwar auf der mit *F* bezeichneten Seite in der Akkommodation für die Ferne, auf der mit *N* bezeichneten in der für die Nähe. Die Ciliarfortsätze sind in dieser Figur so gezeichnet, als wenn man sie durch die zwischen sie eingeschobene Falte der Zonula hindurchsähe, so daß man den Verlauf der Zonula erkennt. Mit *a a* ist der vordere Rand ihrer Falten, mit *b b* der hintere bezeichnet.

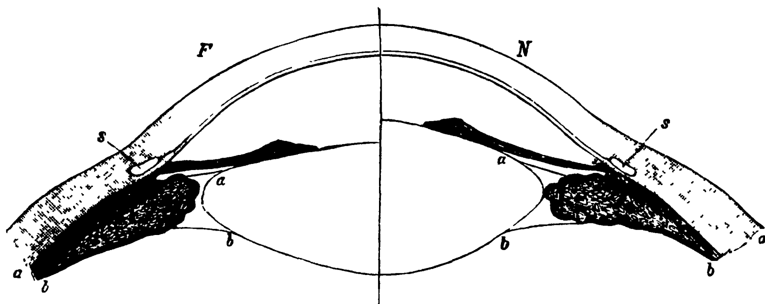


Fig. 63.

Durch die stärkere Wölbung der Oberflächen der Linse wird ihre Brennweite verkürzt, während ihre Hauptpunkte sich gleichzeitig nach vorn verschieben, teils weil die vordere Fläche der Linse vorrückt, teils weil die vordere Fläche im Verhältnis zur hinteren sich stärker wölbt. Beide Umstände tragen dazu bei, die von der Hornhaut konvergent auf die Linse fallenden Strahlen äußerer leuchtender Punkte eher zur Vereinigung zu bringen, als dies in dem fernsehenden Auge geschieht. Die Größe der an der Linse beobachteten Veränderungen scheint auch auszureichen, um die Breite der Akkommodation des lebenden Auges zu erklären.

Andere Veränderungen an den brechenden Teilen des Auges, welche auf die Akkommodation bezogen werden könnten, sind bisher am Auge nicht nachgewiesen worden. Namentlich bleibt die Krümmung der Hornhaut durchaus unverändert. Dagegen wäre es möglich, daß zur Unterstützung der Akkommodation für die Nähe eine Verlängerung des Augapfels durch gleichzeitige Spannung aller sechs Augenmuskeln entstehen könnte. Doch ist bisher eine solche weder nachgewiesen, noch scheint sie nötig zu sein, so wie auch meine in § 2 berichteten Versuche dagegen sprechen, wonach bei verändertem Drucke im Auge die Krümmung der Hornhaut sich ändert, da doch bei der Akkommodation keine Veränderung dieser Krümmung zu beobachten ist. Außerdem ist dagegen geltend zu machen, daß schon ein geringer dauernder Druck auf das Auge die Blutmenge in den Gefäßen der Netzhaut verringert und die Netzhaut selbst unempfindlich gegen das Licht macht.

Über die Art und Weise, wie die Formveränderung der Linse bewirkt wird, läßt sich noch nicht mit Sicherheit aburteilen. Ältere Forscher, wie Th. Young, nahmen an, daß die Linse aus Muskelfasern zusammengesetzt sei, und nannten sie deshalb *Musculus crystallinus*. Allein wenn die Fasern der Linse auch möglicherweise mit Muskelfasern verglichen werden könnten, deren man gegenwärtig äußerst verschiedenartige Formen kennt, so gehen doch keine Nerven zu ihr hin, deren Dasein in den durchsichtigen Gebilden, um die es sich hier handelt, kaum hätte den Beobachtern entgehen können. Außerdem sind bisher alle Versuche mißglückt, an frischen tierischen Linsen durch intermittierende elektrische Ströme, welche alle bekannten muskulösen Gebilde in Zusammenziehung versetzen, Formveränderungen hervorzubringen. Dergleichen Versuche sind unter anderen von Cramer[1] angestellt worden an Augen von frisch getöteten Seehunden und Vögeln, welche die Formveränderung der Linse noch zeigten, so lange die Iris und der Ciliarapparat unverletzt waren, während die freigelegte Linse sich niemals veränderte. Ich selbst habe mit v. Wittich dergleichen Versuche an Linsen frisch getöteter Kaninchen und Frösche vorgenommen mit demselben negativen Erfolge.

Dagegen hat Cramer[1] gefunden, daß Akkommodationsveränderungen an ausgeschnittenen Augen hervorgebracht werden können, wenn man durch den vorderen Teil des Auges intermittierende elektrische Ströme gehen läßt. Die Versuche sind folgende: Auf den Objekttisch eines Mikroskops mit ebenem Beleuchtungsspiegel wurde ein passender hölzerner Ring, und auf diesen, die Hornhaut nach unten, das Auge eines kurz zuvor durch Erhängung getöteten, 5 Wochen alten, Seehunds (*Phoca littorea*) gelegt. Der Augapfel war von Muskeln, Fett und anderen umgebenden Teilen frei gemacht, und an seiner hinteren Seite ein Teil der Sclerotica, Chorioidea und Netzhaut sorgfältig, ohne Verletzung des Glaskörpers, abpräpariert. Bei richtiger Stellung des Mikroskops und seines Spiegels konnte Cramer nun das Bild einer etwa 35 cm entfernten Kerzenflamme sehr deutlich auf der Hinterfläche des Glaskörpers abgebildet wahrnehmen mit 80maliger Vergrößerung. Sobald der Strom eines magnetelektrischen Rotationsapparates an zwei Seiten der Hornhaut eingeleitet wurde, wurde das Bild undeutlicher und breiter.

Alsdann stieß Cramer eine Starnadel an dem Rande der Hornhaut ein, führte ihre Spitze durch die Pupille hinter die Iris, und durchschnitt beim Zurückziehen die Iris, so daß diese eine radiale Spalte bekam, die von ihrem Ansatze bis zur Pupille ging. Danach brachte der elektrische Strom keine Veränderung des Bildchens mehr hervor.

An Augen von Hunden und Kaninchen gelangen diese Versuche nicht, weil unmittelbar nach dem Tode die Pupille sich beträchtlich verengerte, und stärkere elektrische Ströme die Linse (wahrscheinlich durch Elektrolyse) undurchsichtig machten.

An Augen von Tauben fand er, daß bei Einwirkung elektrischer Ströme sich das Bild der vorderen Linsenfläche veränderte, nicht aber das Hornhautbildchen. Die Veränderung des ersteren konnte an solchen ausgeschnittenen Augen noch besser beobachtet werden, nachdem die Hornhaut weggenommen war. Die stärkere Krümmung der Linse dauerte, so lange die Ströme des Induktionsapparates einwirkten, und verschwand nachher wieder. Sie trat nicht mehr ein, sobald die Iris fortgenommen wurde.

[1] Het Accommodatievermogen. p. 58 u. 86.

Cramer schließt hieraus, zunächst daß die Form der Linse durch kontraktile Teile, welche im Auge selbst liegen, verändert werde, und ferner betrachtet er die Iris speziell als dasjenige Organ, welches diese Veränderung hauptsächlich hervorbringe. Er schreibt der Iris eine beträchtliche Wölbung zu, indem er ihren Ursprung auf die innere Fläche des *Musculus ciliaris*, weiter zurückverlegt, als es bisher die Anatomen getan hatten. Bei der Akkommodation des Auges für die Nähe sollen sich nach seiner Annahme gleichzeitig die Kreis- und Radialfasern der Iris verkürzen. Erstere gäben dadurch den letzteren auch an ihrem zentralen Ende einen festen Anheftungspunkt, und die gespannten radialen Fasern übten nun auf die hinter ihnen liegenden Teile (Rand der Linse und Glaskörper) einen Druck aus, welcher bewirkte, daß der mittlere Teil der sehr nachgiebigen elastischen Linse durch die Pupille, wo allein kein Druck auf die Linse stattfände, herauszuquellen strebte, und so die stärkere Wölbung bekäme. Durch die Zusammenziehung des Ringmuskels der Pupille, welche notwendig ist, um den radialen Fasern der Iris am inneren Ende einen Widerhalt zu geben, würde sich dann auch die beim Nahesehen eintretende Verengerung der Pupille erklären.

Donders machte darauf aufmerksam, daß das an der inneren Wand des *Canalis Schlemmii* gelegene elastische Gewebe, an welches sich die Peripherie der Iris zunächst anheftet, von Bedeutung für den Akkommodationsvorgang sein könnte. Da die Iris und der Ciliarmuskel zusammen von dieser Wand des Kanals entspringen, und die Fasern des Muskels nach rückwärts verlaufen, um sich an der Aderhaut festzusetzen, so wird durch eine Zusammenziehung des Muskels, wenn man die Aderhaut als seinen festen Ansatzpunkt betrachtet, das elastische Gewebe in der Wand des Schlemmschen Kanals gedehnt, und der Ansatz der Iris nach hinten gezogen werden können, wodurch sie in eine günstigere Lage kommt, um auf die hinter ihr liegenden Teile einen Druck ausüben zu können.

In der Tat ist leicht einzusehen, daß die peripherischen Teile der Iris zurückweichen müssen, wenn die Mitte der Linse und der Pupillarrand der Iris sich nach vorn bewegen. Denn das Volumen der wässrigen Feuchtigkeit, welche in der vorderen Augenkammer eingeschlossen ist, ist unveränderlich: wenn ihr durch das Vordringen der Linse in der Mitte Raum genommen wird, muß dieser an den Seiten wieder gewonnen werden, dadurch daß die peripherischen Teile der Iris zurückweichen.

Cramer hat bemerkt, daß man bei Kindern mit bloßem Auge beobachten könne, wie sich die vordere Kammer beim Nahesehen erweitert. Ich selbst habe gefunden, daß man dies auch bei Erwachsenen mittels einer besonderen Art der Beleuchtung des Auges erkennen könne. Wenn man nämlich Licht ganz von der Seite her auf das Auge fallen läßt, so daß die Iris größtenteils beschattet ist, so bildet sich bei einer richtigen Stellung des Auges auf der dem Lichte gegenüberliegenden Seite der Iris ein gekrümmter heller Streifen, eine kaustische Linie. In Fig. 64 ist in der unteren Hälfte der Gang der gebrochenen Strahlen für eine Kugel von dem Brechungsvermögen der wässrigen Feuchtigkeit dargestellt, auf welche parallele Strahlen fallen. F sei der Brennpunkt der Zentralstrahlen. Die Randstrahlen weichen erheblich von dem Brennpunkte der Zentralstrahlen ab und schneiden sich mit den nächst benachbarten Strahlen in einer kaustischen Fläche, deren Durchschnitt durch die Kurven GF angegeben ist. Der äußerste Strahl ist CB, er wird gebrochen nach BH; in dem Halbierungspunkte der Sehne des Kreises, welche der gebrochene Strahl bildet, in G, ist das Ende der kaustischen Linie GF. Nun

denke man sich im Inneren der brechenden Kugel Ebenen gelegt, die ähnlich der Iris in der wässrigen Feuchtigkeit liegen. Legen wir eine solche Ebene senkrecht zur Ebene der Zeichnung durch $q_0 P_0$, so wird ihre ganze Vorderfläche vom Lichte getroffen und beleuchtet werden. Legen wir die Ebene durch $q_1 P_1$, so liegt ein Teil derselben vor dem äußersten gebrochenen Strahl $B G$, dieser wird beleuchtet werden; ein anderer liegt dahinter und bleibt dunkel. Legen wir die Ebene durch $q_2 P_2$, so schneidet sie die kaustische Fläche. Es bleibt wieder ein Teil hell, einer dunkel, aber die Grenze zwischen dem beleuchteten und nicht beleuchteten Teile wird jetzt durch eine helle Linie bezeichnet, welche der Linie entspricht, in welcher die Ebene $q_2 P_2$ die kaustische Fläche schneidet. Aus der Figur ist leicht ersichtlich, daß, wenn der Teil der Fläche $q_2 P_2$, welcher die kaustische Fläche schneidet, sich rückwärts bewegt, also von der brechenden Fläche entfernt, die helle Linie dem Rande näher rücken muß.

Fig. 64.

Dies kann man nun an der Iris beobachten, wenn sich das Auge für die Nähe akkommodiert. Beleuchtet man das Auge eines anderen, welcher abwechselnd einen näheren und, ferneren Fixationspunkt betrachtet, die sich genau decken, so von der Seite, daß die kaustische Linie, nahe am Ciliarrande der Iris erscheint, so sieht man sie bei der Akkommodation für die Nähe sich dem Rande nähern, bei der für die Ferne sich davon entfernen. In Fig. 65 ist diese Beleuchtung der Iris dargestellt; das Licht fällt von der Seite in der Richtung des Pfeils auf das Auge: auf der Iris sieht man an der dem Lichte zugekehrten Seite b den Hornhautreflex des Lichts, auf der anderen nach a hin die kaustische Linie, deren Licht zum Teil noch durch den vorspringenden Rand der Sclerotica hindurchscheint.

Fig. 65.

Nach Cramers und Donders' Annahme würden die Iris und der Ciliarmuskel dadurch die Gestaltänderung der Linse bewirken, daß sie den Druck im Glaskörper und auf die Randteile der Linse erhöhen, wobei nur die Mitte ihrer vorderen Fläche hinter der Pupille von dem erhöhten Drucke befreit bleibt. Auch kann dadurch in der Tat die vermehrte Wölbung der vorderen Linsenfläche, welche Cramer zunächst beobachtet hatte, erklärt werden.

Die Gestaltveränderung der Linse dagegen, welche aus meinen Messungen sich ergibt, möchte sich, ohne eine andere Kraft noch zu Hilfe zu nehmen, nicht erklären lassen. Durch den hydrostatischen Druck, der auf die hintere Seite und die Ränder der Linse einwirkt, kann diese nicht wohl in der Mitte dicker werden. Ein solcher Druck würde streben, die Äquatorialebene der Linse nach vorn zu wölben, und dabei ihre hintere Seite flacher zu machen.

Eine Annahme, welche diese Schwierigkeit zu beseitigen geeignet erscheint, ist die, daß die Linse im ruhenden, fernsehenden Zustande des Auges durch die an ihren Rand befestigte Zonula gedehnt wird. Die Falten der Zonula laufen von ihrem Ansatz an der Linsenkapsel nach außen und hinten, wobei sie Scheiden für die Ciliarfortsätze bilden, und verschmelzen endlich am hinteren Ende dieser Fortsätze und des Ciliarmuskels mit der Glashaut, Netzhaut und Aderhaut. Wenn der Ciliarmuskel sich zusammenzieht, kann er das hintere Ende der Zonula nach vorn der Linse nähern und die Spannung der Zonula vermindern. Durch die gespannte Zonula muß aber die Linse nach ihren Äquatorialdurchmessern gedehnt, in der Achse verkürzt, ihre Flächen müssen flacher gemacht werden. Wenn der Zug der Zonula bei der Akkommodation für die Nähe nachläßt, wird die Äquatorialfläche der Linse kleiner, ihre Mitte dicker werden, beide Flächen werden sich stärker wölben. Kommt dazu nun noch der Druck der Iris, so wird diese die Äquatorialebene der Linse nach vorn wölben, und dadurch wird die Wölbung der vorderen Fläche verstärkt, die der hinteren vermindert werden, so daß sie der ursprünglichen Wölbung der fernsehenden Linse wieder nahehin gleich werden kann.

Auf diese Weise scheint sich die Gestaltänderung der Linse erklären zu lassen. Übrigens ist es an toten Augen leicht, durch Zerren an der Zonula Gestaltveränderungen der Linse hervorzubringen. Hiermit würde auch der Umstand in Verbindung stehen, daß ich an lebenden fernsehenden Augen die Linsendicke geringer gefunden habe, als sie an toten Linsen je gefunden wird. Von einer Aufquellung der toten Linsen durch Wasser kann dieser Unterschied wohl kaum hergeleitet werden, da nach den Beobachtungen von W. Krause die Brechungsverhältnisse der äußeren, mittleren und innersten Schichten von Kalbslinsen 24 Stunden nach dem Tode genau dieselben sind, wie unmittelbar nach dem Tode, während man bei einer Wasseraufnahme eine Verminderung des Brechungsvermögens erwarten müßte.

Um eine Übersicht über die wahrscheinliche Veränderung der optischen Konstanten und Kardinalpunkte des Auges zu geben, welche bei der Akkommodation für die Nähe eintritt, und zugleich nachzuweisen, daß die beobachtete Änderung der Form der Linse genügend ist, die Akkommodation zu erklären, habe ich für zwei Akkommodationen eines schematischen Auges, welches den von mir untersuchten nahehin entspricht, die optischen Konstanten berechnet. Das fernsehende Auge unterscheidet sich von Listings schematischem Auge nur dadurch, daß die Linsenflächen etwas nach vorn gerückt und die Linse dünner angenommen ist. Das Brechungsvermögen der wässrigen und gläsernen Feuchtigkeit habe ich, wie Listing, gleich $\frac{103}{77}$, das der Kristallinse gleich $\frac{16}{11}$ genommen. Die Längen sind in Millimetern gemessen. Als Ort eines Punktes ist seine Entfernung von der vorderen Hornhautfläche angegeben.

Nimmt man an, daß bei der Akkommodation für die Ferne dieses schematische Auge in unendliche Ferne blicken könne, so wird die Netzhaut in der Achse des Auges 22,231 mm von der vorderen Hornhautfläche entfernt sein, und bei dem anderen berechneten Akkommodationszustande ein Gegenstand deutlich gesehen werden, welcher 118,85 mm vor dem vorderen Brennpunkte, oder 130,09 mm vor der Hornhaut liegt. Es würde dies der Akkommodationsbreite eines normalen Auges gut entsprechen.

	Akkommodation für	
	Ferne.	Nähe.
Angenommen:		
Krümmungsradius der Hornhaut	8,0	8,0
Desgl. der vorderen Linsenfläche	10,0	6,0
Desgl. der hinteren Linsenfläche	6,0	5.5
Ort der vorderen Linsenfläche	3,6	3,2
Ort der hinteren Linsenfläche	7,2	7,2
Berechnet:		
Vordere Brennweite der Hornhaut	23,692	23,692
Hintere desgl.	31,692	31,692
Brennweite der Linse	43,707	33,785
Abstand des vorderen Hauptpunktes der Linse von der vorderen Fläche	2,1073	1,9745
Abstand des hinteren von der hinteren	1,2644	1,8100
Abstand der beiden Hauptpunkte der Linse voneinander	0,2283	0,2155
Hintere Brennweite des Auges	19,875	17,756
Vordere desgl.	14,858	13,274
Ort des vorderen Brennpunktes	– 12,918	– 11,241
Ort des ersten Hauptpunktes	1,9403	2,0330
Ort des zweiten Hauptpunktes	2,3563	2,4919
Ort des ersten Knotenpunktes	6,957	6.515
Ort des zweiten Knotenpunktes	7,373	6,974
Ort des hinteren Brennpunktes	22,231	20,248

Veränderungen der Hornhautkrümmung wollten einige ältere Beobachter[1] bei ungenaueren Untersuchungsmethoden gefunden habe. Neuere genauere Messungen dieser Krümmung mit Hilfe der reflektierten Bilder haben ergeben, daß sie ganz unverändert bleibt. Solche sind von Senff[2], Cramer[3] und mir selbst angestellt worden. Das Ophthalmometer läßt eine sehr genaue Ausführung dieser Versuche zu, wobei Änderungen des Radius um $1/_{200}$ seiner Größe wahrzunehmen sein würden, während ein Wechsel der Sehweite zwischen 5 Zoll und unendlicher Entfernung einen Wechsel des Krümmungshalbmessers von 6,8 bis 8 mm erfordern würde, wenn eine solche Veränderung die Akkommodation bewirken sollte. Ich habe aber durchaus negative Resultate erhalten. Zu erwähnen ist hier noch ein sehr sinnreicher Versuch von Th. Young, welcher dasselbe beweist. Er beschreibt ihn folgendermaßen: „Ich nehme aus einem kleinen botanischen Mikroskope eine bikonvexe Linse von $^8/_{10}$ (Zoll) Radius und Brennweite, befestigt in einer beckenförmigen Fassung von $^1/_5$ Zoll Tiefe, und mache ihre Kante mit Wachs wasserdicht. Ich tröpfle ein wenig mäßig kaltes Wasser hinein, bis es zu drei Vierteln damit angefüllt ist, und bringe es dann an das Auge, so daß die Hornhaut in das Becken hineinragt und überall mit dem Wasser in Berührung ist. Mein Auge wird dadurch sogleich weitsichtig, und das Brechungsvermögen der Glaslinse, welches durch das Wasser auf etwa 1,6 (Zoll) Brennweite zurückgeführt ist, ist nicht hinreichend, die Stelle der Hornhaut zu vertreten, welche durch das Wasser unwirksam geworden ist; aber die Hinzufügung einer anderen Linse von $5^1/_2$ Zoll Brennweite bringt

[1] J. P. Lobé, Diss. de oculo humano. Lugd. Batav. 1742. p. 119. — Home, *Philos. Transact.* 1796. p. 1.
[2] Wagner, Handwörterbuch der Physiologie. Art. Sehen.
[3] Het Accommodatievermogen der Oogen. Harlem 1853. p. 45.

mein Auge zu seinem natürlichen Zustande zurück, und noch etwas darüber hinaus. Ich wende dann das Optometer an, und finde dieselbe Ungleichheit in der horizontalen und vertikalen Brechung wie ohne Wasser, und ich habe in beiden Richtungen eine Akkommodationsfähigkeit bis zu einer Sehweite von 4 Zoll wie vorher. Im ersten Augenblicke erschien mir die Akkommodation allerdings etwas geringer und nur imstande, das Auge von dem für parallele Strahlen geeigneten Zustande zu einer Sehweite von 5 Zoll zu bringen, und dies ließ mich glauben, daß die Hornhaut eine kleine Wirkung im natürlichen Zustande haben könnte; indem ich aber überlegte, daß die künstliche Hornhaut ungefähr $^1/_{10}$ Zoll vor der Stelle der natürlichen Hornhaut sich befand, berechnete ich die Folgen dieses Unterschiedes und fand ihn genau ausreichend, um die Veringerung des Spielraums der Sehweite zu erklären."

Um wieviel sich beim Nahesehen der Pupillarrand der Iris nach vorn verschiebt, läßt sich wenigstens annähernd bestimmen, nachdem man die Dimensionen und Krümmung der Hornhaut und die Entfernung der Pupillenfläche von der Hornhaut bestimmt hat. Es sei *C* Fig. 66 die Hornhaut, *c* und *d* ihr äußerer Rand, *ab* die Pupille beim Fernsehen. Hat sich nun der Beobachter gegen dieses Auge so gestellt, daß ihm die ganze Pupille gerade verdeckt wird, so muß *cb* die Gesichtslinie des Beobachters in der wässrigen Feuchtigkeit sein. Wird nun beim Nahesehen die ganze Pupille vor dem Rande der Sclerotica eben sichtbar, und kennt man ihre Breite $\alpha\beta$, so muß sie ganz vor der Linie *cb* liegen, und doch an diese anstoßen, so wie in Fig. 60 angegeben ist, und dadurch findet man wenigtens angenähert die Größe ihrer Verschiebung. Diese betrug unter den von mir untersuchten Augen bei dem Auge O. H. 0.36 mm, bei dem Auge B. P. 0.44 mm. Tritt die Pupille beim Nahesehen nicht ganz vor, sondern nur die Hälfte, zwei Drittel usw. derselben, so muß man die Größe des hervortretenden Teils schätzen und danach die Berechnung anstellen.

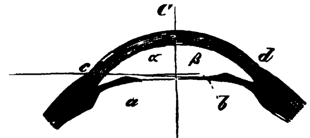


Fig. 66.

Der Krümmungsradius der vorderen Fläche der Linse kann mit Hilfe der von ihr entworfenen Spiegelbilder gemessen werden. Doch sind diese Bilder zu lichtschwach und verwaschen, als daß man eine genaue Messung ihres Abstands mit dem Ophthalmometer ausführen könnte. Wenn man dagegen neben dem Linsenspiegelbild ein Hornhautspiegelbild von veränderlicher Größe erzeugt, so kann man die Größe beider Bilder leicht mit bloßem Auge vergleichen und sie gleich groß machen. Die Größe des Hornhautbildes findet man dann leicht durch Messung oder Rechnung. So ließ ich z. B. zwei vertikal übereinander stehende helle Flammen von der Linse spiegeln, zwei kleinere schwächere Flammen von der Hornhaut, stellte die letzteren so, daß ihre Spiegelbilder dicht neben den Linsenspiegelbildern der großen Flammen erschienen, und deren gegenseitiger Abstand dem der letzteren gleich wurde. Statt eines jeden Paars von Flammen kann man auch bequemer eine Flamme und ihr von einem horizontalen Spiegel entworfenes Spiegelbild gebrauchen.[1]

So maß ich also die Größe der von der vorderen Linsenfläche beim Nahesehen und beim Fernsehen entworfenen Bilder. Es fand sich, daß in gut akkommodierenden Augen das von der vorderen Linsenfläche entworfene Bild beim Nahesehen etwa nur $^5/_9$ der Größe hat, welche ihm beim Fernsehen zukommt. Dies Bild wird von einem aus einer brechenden und einer spiegelnden Fläche zusammengesetzten optischen Systeme entworfen. Die Brennweite dieses Systems kann man zunächst aus der Größe des Bildes, Größe und Entfernung des Objekts nach § 9 Gleichung 8b) berechnen, welche auch für spiegelnde Systeme gilt, aus der Brennweite dann den Radius der spiegeln-

[1] Graefes Archiv f. Ophth. Bd. I. Abt. 2. S. 45.

den Fläche. Es sei f_1 die erste, f_2 die zweite Brennweite des brechenden Systems, welches vor der spiegelnden Fläche liegt, r der Krümmungsradius dieser Fläche, positiv gerechnet, wenn sie konkav, negativ, wenn sie konvex ist, d der Abstand des Scheitels der spiegelnden Fläche vom zweiten Hauptpunkte des brechenden Systems. so ist die Brennweite des zusammengesetzten spiegelnden Systems:

$$q = \frac{f_1 f_2 r}{2(f_2 - d)(f_2 - d + r)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1).$$

Nach dieser Formel wird q kleiner, wenn d kleiner wird, d. h. wenn die vordere Linsenfläche der Hornhaut näher rückt. Wenn q kleiner wird, wird auch das Spiegelbild entfernter Gegenstände in demselben Verhältnisse kleiner. Da jedoch die Veränderung von d etwa nur 0,4 mm beträgt, und $f_2 - d$ etwa 28 mm, $f_2 - d + r$ etwa 38 mm, so ist die Veränderung von q höchst gering und beträgt etwa nur $^1/_{40}$ seiner Größe, während die direkte Beobachtung der Bilder etwa $^4/_9$ gibt. Die Verkleinerung der Bilder kann also nicht durch das Verschieben der vorderen Linsenfläche, sondern in der Tat nur durch vermehrte Krümmung dieser Fläche erfüllt werden.

Durch die Beobachtung an lebenden Augen ergab sich in dieser Weise

Auge	Krümmungshalbmesser der vorderen Linsenfläche		Verschiebung der Pupille bei Akkommodation für die Nähe
	fernsehend	nahsehend	
O. H.	11,9	8,6	0,36
B. P.	8,8	5,9	0,44
J. H.	10,4		

Um die Krümmungsradien der vorderen Linsenfläche nach der obigen Gleichung berechnen zu können, muß man den Krümmungsradius der Hornhaut und die Entfernung der vorderen Linsenfläche (Pupille) von der Hornhaut kennen. Beide Größen waren an den angeführten Augen schon vorher gemessen.

Das Spiegelbild, welches die hintere Linsenfläche von fernen Gegenständen entwirft, verändert seine Größe ebenfalls bei geänderter Akkommodation des Auges, aber in sehr unbedeutendem Grade. Ich beobachtete diese Veränderung durch das Ophthalmometer. indem ich zwei Flammen senkrecht übereinander seitlich vom Auge hinter den Öffnungen eines Schirms aufstellte und deren von der hinteren Linsenfläche gespiegelte Bilder beobachtete. Ich stellte die Doppelbilder der beiden Lichter. so wie Fig. 67 zeigt. nebeneinander. Hier sind a_0 und a_1 die Doppelbilder des unteren. b_0 und b_1 die des oberen Lichts. Die einander genäherten Bilder a_1 und b_0 deckten sich nicht, sondern standen dicht nebeneinander, so daß ich sie gesondert er kennen konnte. Bei der Akkommodation für die Nähe verschob sich b_0 etwas in der Richtung nach a_0 und a_1 in der Richtung nach b_1 hin. Ich schätzte die Breite der Verschiebung etwa gleich der Hälfte der Breite eines jeden lichten Flecks, und da die Entfernung der Mittelpunkte der Öffnungen, durch welche das Licht fiel. gleich sechsmal der Breite der Öffnungen war, so war die Verkleinerung des Bildes etwa $^1/_{12}$ seiner Größe.

b_1 / b_0 / a_1 / a_0

Fig. 67.

Endlich suchte ich noch zu ermitteln, ob die hintere Linsenfläche sich bei der Adaptation für die Nähe in der Richtung von hinten nach vorn verschöbe. Ich verfuhr dabei in derselben Weise, wie ich die scheinbare Entfernung der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut bestimmt hatte. Bei derselben Anordnung des Apparates untersuchte ich, ob der Lichtreflex der hinteren Linsenfläche bei veränderter Adaptation und unveränderter Richtung der Augenachse seinen Platz änderte. wobei ab-

wechselnd das Fernrohr rechts und das Licht links, dann wieder das Fernrohr links und das Licht rechts stand. Indessen habe ich keine Ortsveränderung dieses Bildchens bemerken können. Die scheinbare Entfernung der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut wird also bei den Adaptationsänderungen nicht merklich verändert.

Was dürfen wir nun aus diesen Veränderungen des Spiegelbildchens und des scheinbaren Ortes der hinteren Linsenfläche auf die wirklichen Veränderungen derselben für Schlüsse ziehen? Der scheinbare Ort dieser Fläche wird durch die Brechung in der Linse überhaupt sehr wenig geändert, da sie dem hinteren Knotenpunkte der Linse ziemlich nahe liegt, und wir können daraus schließen, daß auch die Unterschiede ihrer Verschiebung durch die Brechung bei verschiedenen Akkommodationszuständen des Auges jedenfalls so klein sein werden, daß wir sie vernachlässigen können. So wird z. B. in den beiden schematischen Augen. deren optische Konstanten wir in diesem Paragraphen als Beispiel berechnet haben, in dem fernsehenden Auge die hintere Linsenfläche scheinbar um 0.191 mm. in dem nahesehenden um 0,113 mm. nach vorn verschoben, würde also, während sie in Wirklichkeit an ihrer Stelle bleibt, sobald das Auge sich für die Nähe akkommodiert, scheinbar um 0,078 mm nach hinten rücken. Dies ist aber zu wenig, um wahrgenommen zu werden. Übrigens kann diese Rechnung eben nur dazu dienen, zu zeigen, daß die Verschiebungen und ihre Unterschiede überhaupt klein sind, keineswegs um den Sinn dieses Unterschiedes in der wirklichen Kristallinse zu zeigen, weil hierbei wesentlich die Entfernung der Hauptpunkte der Linse voneinander in Betracht kommt, welche in der Kristallinse jedenfalls geringer ist als in den schematischen homogenen Linsen.

Wir können also nur sagen, daß der wahre Ort der hinteren Linsenfläche bei den Akkommodationsänderungen nicht merklich geändert werde.

Um zu ermitteln, wie das von der hinteren Linsenfläche entworfene Spiegelbild sich bei Änderungen der Augenmedien verändere, denken wir uns die spiegelnde Fläche durch eine unendlich dünne Schicht Glaskörper von der letzten brechenden Fläche des Auges getrennt. Dann können wir für die Kardinalpunkte des brechenden Systems die Kardinalpunkte des Auges nehmen. Es sei n das Brechungsverhältnis des Glaskörpers; ferner nennen wir p die Entfernung des hinteren Brennpunktes des Auges von der hinteren Linsenfläche nach hinten gerechnet, ε die des zweiten Knotenpunktes des Auges von derselben Fläche nach vorn gerechnet. In der Gleichung 1), welche die Brennweite eines zusammengesetzten brechenden und spiegelnden Systems gibt, haben wir zu setzen

$$f_1 = p + \varepsilon$$
$$f_2 = n(p + \varepsilon)$$
$$f_2 - d = p.$$

Dann wird der Wert der Brennweite des brechenden und spiegelnden Systems:

$$q = \frac{nr}{2} \cdot \frac{(p + \varepsilon)^2}{p(p + r)} \qquad \text{2)}.$$

Bei der Akkommodation für die Nähe wird ε jedenfalls größer, weil bei der Gestaltveränderung der Linse die Knotenpunkte des Auges vorrücken müssen; dadurch würde auch, wenn sich r und p gar nicht veränderten, der Wert von q und die Größe des Spiegelbildes zunehmen müssen. Dagegen wird p bei der Akkommodation für die Nähe kleiner, und dadurch kann der Wert von q auch kleiner werden, unter den Verhältnissen dieser Größen im Auge. Differentiiert man q nach p, so erhält man

$$\frac{dq}{dp} = \frac{nr}{2} \cdot \frac{p + \varepsilon}{p^2(p + r)^2} [pr - (2p + r)\varepsilon].$$

Von den Faktoren dieses Ausdrucks kann nur der letzte, in der eckigen Klammer eingeschlossene negativ werden, wird es aber wohl im normalen Auge nicht, da ε

gegen p und r sehr klein ist. Es wird also $\frac{dq}{dp}$ positiv sein, d. h. q wird mit p zugleich größer und kleiner werden. Es würde also bei der Akkommodation für die Nähe, wobei p kleiner wird, wenn wir vorläufig von der Veränderung von ε absehen und r konstant setzen, auch q und das Spiegelbild der hinteren Linsenfläche kleiner werden können, und man könnte vermuten, die beobachtete Verkleinerung dieses Bildes sei dadurch hervorgebracht. Die Rechnung nach der Gleichung 2) indessen ergibt das Gegenteil. Nehmen wir aus LISTINGs schematischem Auge die Werte $p = 14.647$, $\varepsilon = 0.3601$, $r = 6$, so würde p auf 10.597 verkleinert werden müssen, um q um $^1/_{12}$ seines Wertes zu verringern. Der hintere Brennpunkt des Auges müßte also 4 mm vor die Netzhaut rücken, was jedenfalls schon die mögliche Veränderung der Lage dieses Punktes überschreitet. Aber da ein Teil der hierdurch bewirkten Verkleinerung des Bildes durch das Vorrücken der Knotenpunkte, die Vergrößerung von ε, wieder aufgehoben werden würde, wie vorher auseinandergesetzt ist, so können wir nicht zweifeln, daß die Verkleinerung des Bildchens auf der hinteren Linsenfläche ohne eine, wenn auch geringe Vermehrung der Krümmung dieser Fläche nicht die beobachtete Größe haben könne.

Berechnet man die Brennweiten q für die beiden schematischen Augen dieses Paragraphen, so findet man für das fernsehende 5.6051, für das nahesehende 5.3562, welche Größen nur um $^1/_{21}$ ihres Wertes unterschieden sind, während die dazu gehörigen Krümmungsradien (6 und 5.5 mm) um $^1/_{12}$ differieren. Hier verdeckt also die Änderung der brechenden Mittel die des Krümmungsradius zum Teil, und läßt sie kleiner erscheinen, als sie wirklich ist. Wir schließen daraus, daß die hintere Fläche der Linse bei der Akkommodation für die Nähe sich stärker wölbt.

Für den Mechanismus der Akkommodation ist es wichtig, den Ursprung der Iris genau zu kennen. Ich habe den *Canalis* SCHLEMMII mit Umgebung, wie er sich auf feinen Querschnitten der Augenhäute darstellt, in Fig. 3, S. 6 abgebildet. *A* ist der Querschnitt des Kanals, der wohl auch im lebenden fernsehenden Auge eine längliche Spalte bildet, *C* die Kornea, *S* die Sclerotica, *D* die Bindehaut, *B* die Aderhaut, *E* ein Ciliarfortsatz, *J* die Iris. Die innere Wand des Kanals ist aus verschiedenen Geweben zusammengesetzt. Der hinterste Teil dieser Wand bei *a* besteht ganz deutlich aus demselben Gewebe eng durchflochtener Sehnenfasern wie die Sclerotica, von der er ausgeht. Der vordere Teil besteht dagegen aus einem anderen Gewebe, welches undurchsichtiger ist als das Sehnengewebe, aus stärker sich abzeichnenden, gegen Essigsäure und Kali sehr resistenten Fasern besteht, und daher wohl für elastisches Gewebe zu halten ist. Nach vorn schiebt es sich zwischen *Membrana* DESCEMETII und die Knorpelsubstanz der Hornhaut ein, nach hinten heftet es sich teils an den hinteren sehnigen Teil der Wand, teils verbindet es sich mit den Faserzügen des Spannmuskels der Aderhaut. Das System der Aderhaut hängt nur mit der hinteren Hälfte der inneren Wand des SCHLEMMschen Kanals fest zusammen, wo der sehnige und elastische Teil sich verbinden. Doch entspringt auch von dem vorderen Teile der Kanalwand ein lockeres Netzwerk von Fasern, die die Charaktere der elastischen an sich tragen, welche sich an den Anfang der Iris anheften. Die Fasermassen, welche dem Spannmuskel und der Iris angehören, sieht man zum Teil von der Wand des Kanals entspringen, zum Teil mögen sie aber auch direkt von der Aderhaut auf die Iris übergehen. In dem Gewebe der Ciliarfortsätze sieht man eine große Zahl weiter Lumina durchschnittener Blutgefäße, auf ihrem dem Glaskörper zugekehrten Rande die Lage des schwarzen Pigments.

Um sich von der Richtigkeit der hier gegebenen Darstellung des Ansatzes der Iris zu überzeugen, muß man einerseits feine Schnitte von getrockneten Augenhäuten untersuchen, dabei aber beachten, daß das Trocknen sehr starke Verzerrungen hervorbringen kann, und daß die elastischen Fasern vor dem Ansatze der Iris sehr leicht reißen oder brechen, wenn man die Iris von der Hornhaut abzieht. Andererseits muß

man frische Präparate untersuchen, wobei man am besten eine Borste in den SCHLEMMschen Kanal einführt, ebenfalls aber sehr sorgfältig jedes Ziehen an der Iris oder Chorioidea vermeiden muß, denn dadurch kann man der Muskelmasse, durch welche diese Teile befestigt sind, jede beliebige Gestalt geben. Hebt man die Iris leise auf, und legt sie auf die Ciliarfortsätze zurück, so bemerkt man die feinen elastischen Fäden, welche sich zum vorderen Rande des Kanals hinüberspannen. Zieht man dann die Borste nach vorn, so erkennt man leicht die elastische Dehnbarkeit des vorderen Teils der Kanalwand. Schlägt man dagegen Iris und Chorioidea nach vorn über, und zieht die Borste nach hinten an, so zeigt sich der hintere Teil der Wand als unausdehnsam.

Die beschriebene Art des Ansatzes scheint mir für das Zurückweichen der Seitenteile der Iris beim Nahesehen wichtig zu sein. Ist die Iris nämlich erschlafft, so wird sie durch das Netzwerk der elastischen Fasern bei *b* bis zum vorderen Rande des SCHLEMMschen Kanals an dessen innerer Wand festgehalten. Spannen sich dagegen die zirkulären und radialen Fasern der Iris gleichzeitig, so bietet erst die Sehnenmasse am hinteren Rande des Kanals ihrem Zuge einen genügend festen Widerstand, und man kann daher sagen, die erschlaffte Iris setzt sich an den vorderen, die gespannte an den hinteren Rand des SCHLEMMschen Kanals, welche im Mittel 0,45 mm auseinander liegen. In Fig. 63 habe ich das verschiedene Verhalten des Ansatzes der Iris beim Fernsehen (Seite *F*) und Nahesehen (Seite *N* der Figur) darzustellen gesucht. Der SCHLEMMsche Kanal ist auf beiden Seiten mit *s* bezeichnet.

Ein anderer Teil des Auges, dessen Wirkungen bei der Akkommodation noch in Betracht kommen könnten, sind die Ciliarfortsätze. L. FICK[1] hat nachgewiesen, daß sie unter dem Einflusse des elektrischen Stromes sich zusammenziehen, und ihr Blut entleeren, welches durch ziemlich weite Gefäßverbindungen leicht in die *Vasa vorticosa* der Aderhaut abfließen kann. Er nimmt an, daß durch diesen Übergang des Blutes in dem Teile des Auges, welcher hinter der durch die Linse und Zonula gebildeten Scheidewand liegt, der hydrostatische Druck vermehrt, vorn vermindert werde. Dadurch werde die Mitte der Linse nach vorn gedrängt, ihre vordere Fläche wölbe sich deshalb mehr. Dagegen behauptet FICK folgerichtig, daß die hintere Fläche dabei flacher werde, was meinen Beobachtungen nicht entspricht. Auch J. CZERMAK[2] hat in einem Versuche, den Mechanismus der Akkommodation zu erklären, neben der von CRAMER angenommenen Spannung der Iris und des Ciliarmuskels eine Anschwellung der Ciliarfortsätze zu Hilfe genommen, wodurch ein Druck auf den Rand der Linse ausgeübt werden könnte.

Gegen die Ansicht, daß die Augenmuskeln durch ihren Druck auf den Augapfel dessen Gestalt veränderten, ihn namentlich in Richtung der Augenachse verlängerten, und dadurch die Netzhaut weiter von der Linse entfernten, eine Ansicht, die vor der Entdeckung der Formänderung der Linse viel gewichtige Freunde hatte, ist anzuführen, erstens, daß, wie ich durch Messungen mit dem Ophthalmometer gefunden habe, jede Steigerung des hydrostatischen Drucks im Auge die Hornhaut flacher macht, was man an lebenden Augen würde beobachten können, wenn es der Fall wäre, und zweitens, daß bei einem geringen Drucke mit dem Finger auf den Augapfel durch den Augenspiegel beobachtet werden kann, wie die Gefäße der Netzhaut enger werden, nur noch intermittierende Blutströme bei den Pulswellen hindurchlassen, endlich ganz kollabieren. Sobald die intermittierende Bewegung (sichtbare Pulsation der Schlagadern) beginnt[3], verschwindet die Empfindlichkeit der Netzhaut, wahrscheinlich wegen ungenügender Blutzufuhr, und das Gesichtsfeld wird vollkommen schwarz.

Endlich sind noch die Versuche von TH. YOUNG anzuführen, welche wohl kaum einen Zweifel darüber bestehen lassen können, daß auch nicht die geringste Ver-

[1] J. MÜLLERS Archiv. 1853. S. 449.
[2] Prager Vierteljahrsschr. XLIII. S. 109.
[3] DONDERS in Nederl. Lancet. 1854. Novb. S. 275.

längerung der Augenachse beim Nahesehen eintritt. Man kann die Fläche der Bindehaut des Auges zwischen den Augenlidern mit einem glatten, gut polierten Stücke Metall ohne erhebliche Beschwerde berühren. Man setze in den inneren Augenwinkel auf die Bindehaut einen glatten eisernen Ring (eines Schlüssels) auf, den man fest gegen den inneren Rand der Augenhöhle anstemmt, und wende das Auge nach der inneren Seite herüber, so daß man durch den Ring und an dem Nasenrücken vorbei in die Ferne sieht. Dabei kommt der innere Umfang der Hornhaut ganz dicht an den Schlüssel zu liegen, und es wird somit verhindert, daß der Augapfel bei der Akkommodation sich nach vorn verschieben könne. Nun dränge man den Ring eines ganz kleinen Schlüssels am äußeren Augenwinkel zwischen den Augapfel und Knochen ein. Dabei wird durch den Druck auf den Augapfel die Netzhaut gereizt, und es erscheint im Gesichtsfelde scheinbar vor dem Nasenrücken ein dunkler, anfangs auch wohl heller Fleck, ein Druckbild. Dieses reichte bei Young bis auf die Stelle des deutlichsten Sehens, und er konnte erkennen, daß gerade Linien im Bereiche dieses Druckbildes eine leichte Krümmung erhielten, welche von einer durch den Druck veranlaßten leichten Einbiegung der Sclerotica herzurühren schien. Da das Druckbild an der Stelle des deutlichsten Sehens entstand, mußte der kleine Schlüssel die Gegend des gelben Flecks an der Hinterseite des Augapfels treffen. Unter diesen Umständen kann eine Verlängerung der Augenachse offenbar nicht eintreten, ohne die Schlüssel von ihrer Stelle zu drängen. Wäre also die Akkommodation mit einer Verlängerung der Augenachse verbunden, so müßte sie unter diesen Umständen entweder ganz unmöglich sein, oder es müßten die Schlüssel verdrängt werden, und es müßte dabei das Druckbild wegen stärkerer Einbiegung der Hinterwand des Augapfels an Umfang außerordentlich zunehmen. Nichts von allem diesem ist der Fall. Das Auge kann vollständig so gut wie sonst akkommodiert werden, und das Druckbild bleibt bei veränderter Akkommodation ganz dasselbe.

Th. Young scheint etwas hervorstehende Augen gehabt zu haben, wie auch aus anderen Versuchen, welche er beschreibt, hervorgeht. In meinem eigenen Auge reicht nur der eine Rand des Druckbildes bis zur Stelle des deutlichsten Sehens; übrigens konnte auch ich mich vollständig von der Möglichkeit der Akkommodation und der Unveränderlichkeit des Druckbildes überzeugen.

Aus diesem Versuche folgt zunächst unmittelbar, daß die Entfernung des inneren Umfangs der Hornhaut von dem gelben Flecke oder einem Punkte der Hinterwand etwas nach außen vom gelben Flecke vollständig unveränderlich sei. Es würde aber die Entfernung der Hornhaut von dem gelben Flecke ohne auffallende Asymmetrie des Auges sich nicht verändern können, wenn nicht die genannte Entfernung ihres Randes sich ebenfalls änderte.

Forbes meinte, daß bei der Akkommodation für die Nähe das innere Auge unter einen stärkeren Druck gesetzt werde, und die Linse, weil sie wegen der verschiedenen Form und Dichtigkeit ihrer Schichten nach verschiedenen Richtungen hin verschieden elastisch sei, ihre Form ändere. De Haldat hat dagegen keine Veränderung der Brennweite des brechenden Apparates des Auges und einzelner Linsen finden können, welche er im Wasser komprimierte[1].

Über keinen anderen Gegenstand der physiologischen Optik sind so viel widersprechende Ansichten aufgestellt worden, als über die Akkommodation des Auges, weil erst in der allerneuesten Zeit entscheidende Beobachtungstatsachen gefunden wurden, und man bis dahin fast nur einem Spiel von Hypothesen überlassen gewesen war. Um die Übersicht zu erleichtern, werde ich die chronologische Ordnung verlassen, welche überdies in der nachfolgenden Zusammenstellung der Literatur beibehalten werden wird, und werde die verschiedenen Ansichten vielmehr nach ihren wesentlichen Zügen zusammengruppieren.

---

[1] *Comptes rendus.* XX. p. 61, 458 u. 1561.

1. Ansichten, welche die Notwendigkeit und das Vorhandensein einer Änderung des brechenden Apparates ganz leugnen. Mehrere Naturforscher glaubten, daß das tierische und menschliche Auge die Fähigkeit habe, abweichend von den künstlich gefertigten Linsen die Bilder verschieden entfernter Gegenstände an gleichem oder wenigstens unmerkbar verschiedenem Orte zu entwerfen. MAGENDIE[1] behauptete, sich davon an den Augen von weißen Kaninchen überzeugt zu haben, bei denen das Pigment der Aderhaut fehlt, und daher das Bild durch den hinteren Teil der Sehnenhaut gesehen werden kann. In der Tat kann aber das Bild nicht scharf genug durch die Sehnenhaut gesehen werden, um die geringen Unterschiede, welche bei der Akkommodation in Betracht kommen, zu bemerken. Dasselbe wie MAGENDIE, behaupteten RITTER[2], HALDAT[3] und ADDA[4]. Für die Kristallinse allein genommen, behaupteten HALDAT und ENGEL[5] dasselbe. Wenn man die Kristallinse aus den Augenflüssigkeiten herausnimmt, und sie von Luft umgeben untersucht, wird ihre Brennweite außerordentlich kurz, und dann folgt aus den allgemeinen optischen Gesetzen, daß die Abstände der Bilder für unendlich oder 7 Zoll entfernte Objekte nicht merklich unterschieden seien. Dadurch erklären sich die von ENGEL erhaltenen Resultate[6].

Durch genauer angestellte Versuche haben sich dagegen HUECK[7], VOLKMANN[8], GERLING[9], MAYER[6] und CRAMER[10] experimentell überzeugt, worüber die Theorie schon keinen Zweifel lassen konnte, daß auch tierische und menschliche Augen Bilder verschieden entfernter Gegenstände in verschiedenen Entfernungen entwerfen.

TREVIRANUS[11] glaubte auch eine theoretische Erklärung für die vermeintliche Tatsache geben zu können, daß die Lage der Bilder unabhängig von der Lage des Gegenstandes sei, indem er ein besonderes Gesetz für die Zunahme der Dichtigkeit in der Linse zu diesem Ende annahm. Seine mathematische Beweisführung ist durch KOHLRAUSCH[12] widerlegt worden.

STURM[13] glaubte die Abweichungen, welche die brechenden Flächen des Auges verglichen mit genauen Rotationsflächen zeigen, benutzen zu können, um die Akkommodation für verschiedene Abstände zu erklären. Er untersucht zunächst den Gang homozentrischer Strahlen, wenn sie durch eine krumme Fläche gebrochen sind, welche nicht eine Rotationsfläche ist, und findet, daß sie dann nicht in einen Brennpunkt vereinigt werden, sondern daß zwei Brennebenen für die gebrochenen Strahlen existieren. In der einen dieser Brennebenen findet die Vereinigung der Strahlen nach einer Richtung statt, in der anderen nach der darauf senkrechten. Wenn der Querschnitt des Strahlenbündels in der einen Brennebene eine kurze horizontale gerade Linie bildet, so geht er durch eine Ellipse mit horizontaler größter Achse in einen Kreis über, wenn man sich der anderen Brennebene nähert, und dann durch eine Ellipse mit senkrechter großer Achse in eine senkrechte gerade Linie, wenn man bis zur anderen Brennebene fortschreitet. Zwischen den beiden Brennebenen hält STURM den Querschnitt des

[1] *Précis élémentaire de Physiologie.* I. p. 73.
[2] GRAEFE und WALTHERS Journal. 1832. Bd. VIII. S. 347.
[3] *Comptes rendus.* 1842.
[4] *Ann. d. Ch. et de Phys.* Sér. 3. Tom. XII. p. 94.
[5] J. ENGEL, Prager Vierteljahrsschr. 1850. Bd. I. S. 167.
[6] S. ihre Widerlegung durch MAYER, ebenda. 1850. Bd. IV. Außerord. Beilage.
[7] Diss. de mutationibus oculi internis. Dorpati 1826. p. 17. — Die Bewegung der Kristallinse. Leipzig 1841.
[8] Neue Beiträge zur Physiol. d. Gesichtssinnes. 1836. S. 109.
[9] POGGENDORFFS Ann. XLVI. 243.
[10] Het Accommodatievermogen. Haarlem 1853. S. 9.
[11] Beiträge zur Anat. u. Physiol. der Sinneswerkzeuge. 1828. Heft I.
[12] Über TREVIRANUS Ansichten vom deutlichen Sehen in der Nähe und Ferne. Rinteln 1836.
[13] *Comptes rendus.* XX. 554, 761 u. 1238. S. die Widerlegungen von CRAHAY, *Bull. de Bruxelles.* XII. 2. 311. BRÜCKE, Berl. Berichte. I. 207.

Strahlenbündels im Auge für klein genug. um deutliche Bilder zu geben. Wird der leuchtende Punkt dem Auge genähert, so werden beide Brennebenen sich von der Linse entfernen. so lange aber die Netzhaut sich zwischen beiden Brennebenen befindet. würden die Bilder doch hinreichend deutlich bleiben.

Abweichungen der Art, wie sie STURM annimmt. scheinen in der Tat bei den meisten menschlichen Augen vorzukommen. und wir werden die davon abhängigen Erscheinungen in § 14 beschreiben. ebenda uns aber auch überzeugen. daß das Intervall der beiden Brennebenen lange nicht so bedeutend ist. wie STURM voraussetzt. und daß die erwähnte Abweichung des Auges keineswegs die Deutlichkeit des Sehens vermehrt. im Gegenteil vermindert.

DE LA HIRE[1] behauptete. daß es nur einen Abstand des deutlichen Sehens gebe. und daß in einer gewissen Entfernung vor ihm und hinter ihm die Gegenstände noch nicht so undeutlich erschienen. um nicht erkannt zu werden; sonst gebe es keine Akkommodation. HALLER[2] ist im wesentlichen derselben Meinung. und meint nur. daß auch die Verengerung der Pupille ein Hilfsmittel sei. um die Zerstreuungskreise naher Gegenstände kleiner zu machen: ebenso in neuester Zeit BESIO[3].

Alle diese Ansichten. welche die Notwendigkeit und das Vorhandensein einer inneren Veränderung des Auges ganz leugnen. werden am einfachsten widerlegt durch die Tatsache, daß wir einen in unveränderlicher Entfernung vor dem Auge liegenden Punkt willkürlich bald deutlich. bald undeutlich sehen können. Sie werden ferner widerlegt durch den SCHEINERschen Versuch. da wir einen solchen Punkt durch ein Kartenblatt mit zwei Öffnungen willkürlich bald einfach. bald doppelt sehen können, und endlich durch die schon in § 11 erwähnten Beobachtungen mit dem Augenspiegel, wobei die Veränderungen des optischen Bildes auf der Netzhaut auch objektiv sichtbar gemacht werden.

2. Ansichten. wonach die Verengerung der Pupille zur Akkommodation für die Nähe genügen sollte. Die Tatsache. daß sich die Pupille beim Nahesehen verengt. war von SCHEINER[4] gefunden worden. Wäre das Auge für die Ferne akkommodiert. so würden die Zerstreuungskreise. in welchen naheleuchtende Punkte auf der Netzhaut sich abbilden. durch Verengerung der Pupille allerdings verkleinert werden können. Indessen überzeugt man sich durch einen einfachen Versuch leicht davon. daß die Verengerung der Pupille nicht genügend ist. um das Auge für die Nähe zu akkommodieren. Man braucht nur durch ein Kartenblatt mit einer Öffnung zu sehen. die enger als die Pupille ist. und welches gleichsam eine künstliche unbewegliche Pupille vertritt. um sich zu überzeugen. daß man auch dann beim Fernsehen nahe Gegenstände undeutlich sieht. beim Nahesehen ferne. Anhänger einer solchen Ansicht waren außer HALLER. den ich schon genannt habe. LE ROY[5]. HALL[6]. MORTON[7]. Die Beweise gegen diese Meinung brachten vor OLBERS[8]. DUGES[9]. HUECK und DONDERS[10]. Eine eigentümliche Ansicht über den Erfolg der Verengerung der Pupille, die aber durch den schon genannten Versuch ebenfalls widerlegt wird. stellte J. MILE[11] auf. nahm sie aber selbst später wieder zurück[12]. Er glaubte, daß beim Fernsehen die Randstrahlen des Lichtbündels. welche vor der Netzhaut die Augen-

[1] *Journal des Sçavans.* 1685. p. 398.
[2] Elementa Physiologiae. 1743. Tom. V. p. 516.
[3] *Giornale Arcad.* CV. p. 3.
[4] Oculus. p. 31.
[5] *Mém. d. l'Acad. d. Sciences.* 1755. p. 594.
[6] MECKELS Archiv. Bd. IV. S. 611.
[7] *American Journal of med. Sciences.* 1831. Nov.
[8] De oculi mutationibus internis. Gotting. 1780. p. 13.
[9] *Institut* 1834. No. 73.
[10] RUETE, Leerboek der Ophthalmologie. 1846. bl. 110.
[11] MAGENDIE, *Journal de Physiologie.* VI. p. 166.
[12] POGGENDORFFS Ann. XLII.

achse schneiden würden, durch Diffraktion am Rande der Pupille von der Augenachse abgelenkt würden, und sie deshalb erst später schnitten. Die Diffraktion des Lichts besteht aber keineswegs in einer solchen einfachen Ablenkung der ganzen Strahlen.

3. Ansichten, welche eine veränderte Krümmung der Hornhaut voraussetzen. LOBÉ[1] scheint der erste gewesen zu sein, der eine Veränderung der Hornhautkrümmung wahrgenommen zu haben meinte. OLBERS[2] wagt nach seinen eigenen Beobachtungen nicht bestimmt zu behaupten, daß die Konvexität beim Nahesehen zunehme. HOME[3], ENGELFIELD und RAMSDEN dagegen wollten eine Vermehrung der Krümmung bestimmt wahrgenommen haben. Jemand, der ein gutes Akkommodationsvermögen besitzt, wurde mit dem Kopf in den Ausschnitt eines festen Brettes befestigt, so daß sein Kopf möglichst unbeweglich war. An dem Brette, in einem kleinen Abstande vom Auge, war eine Platte mit einer kleinen Öffnung befestigt (als Fixationspunkt), während ebenfalls an dem Brette zur Seite des Auges ein bewegliches Mikroskop angebracht war, durch welches man die vorderste Krümmung der Hornhautfläche wahrnehmen konnte. Das Mikroskop selbst war mit einem Okularmikrometer versehen. Beim Nahesehen sollte die Hornhaut stärker gekrümmt werden, so daß ihre Mitte um $^1/_{800}$ eines englischen Zolles vorrückte. Messung der Spiegelbildchen auf der Hornhaut, welche HOME später ausführte, ergab zweifelhaftere Resultate. Wahrscheinlich ist er in beiden Fällen durch sehr kleine, regelmäßig eintretende Verschiebungen des Kopfes der beobachteten Person von hinten nach vorn getäuscht worden. TH. YOUNG[4] fand, indem er die Spiegelbilder der Hornhaut der Messung unterwarf, keine solche Unterschiede, und widerlegte namentlich die Hypothese der veränderten Hornhautkrümmung sehr schlagend in der oben beschriebenen Weise dadurch, daß er die unveränderte Existenz des Akkommodationsvermögens nachwies, auch wenn das Auge unter Wasser gebracht ist. HUECK[5] fand bei der Wiederholung von HOMES Versuchen ähnliche Resultate, meint aber ermittelt zu haben, daß die Atmungsbewegungen regelmäßige Schwankungen des Kopfes hervorbringen, indem wir beim Nahesehen gewöhnlich einatmen, beim Fernsehen ausatmen. Sobald er den Atem anhalten ließ, traten gar keine oder nur sehr unregelmäßige Schwankungen der Mitte der Hornhaut ein. Diese unregelmäßigen Schwankungen schienen durch Kontraktionen des Schließmuskels der Augenlider hervorgebracht zu sein, da bei jeder Berührung der Cilien der Augapfel etwas zurückgedrängt wurde. BUROW[6] fand bei einer sorgfältigen Wiederholung von HOMES Versuchen keine regelmäßigen Schwankungen der Hornhautfläche. Ebenso VALENTIN[7]. SENFF[8] stellte Messungen der Spiegelbildchen mit einem Fernrohr an, wodurch seine Messungen von kleinen Verschiebungen des Auges unabhängig wurden, und fand, daß der Krümmungshalbmesser der Hornhaut sich nicht um 0,01 Par.-Linie veränderte, während das Auge bald auf 4, bald auf 222 Zoll akkommodiert wurde. Auch CRAMER[9] erhielt negative Resultate bei einer Messung der Spiegelbilder auf der Hornhaut mit Hilfe seines Ophthalmoskops. Sehr leicht und genau läßt sich diese Art von Messungen mittels des von mir konstruierten Ophthalmometers[10] ausführen und gab mir ebenfalls stets negative Resultate.

Als Anhänger der Ansicht, wonach die Akkommodation durch Änderung der Hornhautkrümmung bewirkt werde, sind aus neuerer Zeit noch anzuführen FRIES[11],

1 ALBINUS, Dissert. de oculo humano. Lugd. Bat. 1742. p. 119.
2 De oculi mutat. int. p. 39.
3 *Philosoph. Transact.* 1795. p. 13 u. 1796. p. 2.
4 *Philosoph. Transact.* 1801. I. p. 55.
5 Die Bewegung der Kristallinse. S. 40.
6 Beiträge zur Physiologie und Physik des menschl. Auges. Berlin 1842. S. 115.
7 Lehrbuch der Physiologie. 1848. Bd. II. S. 122.
8 WAGNERS Handwörterbuch der Physiologie. Art. Sehen. S. 303.
9 Het Accommodatievermogen. bl. 45.
10 GRAEFES Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abt. II. S. 24.
11 Über den optischen Mittelpunkt im menschl. Auge. Jena 1839. S 27.

Vallée[1] und Pappenheim[2]. Der letztere nimmt an, daß die Kontraktion der Iris beim Nahesehen die Hornhaut konvexer mache.

4. Ansichten, nach welchen die Akkommodation durch Verschiebung der Linse bewirkt wird. Diese Annahme war die älteste, denn schon Kepler[3], aus dessen Theorie des Sehens sich zuerst auch die Notwendigkeit der Akkommodation ergab, stellte sie auf, und sie hat zu jeder Zeit viele Anhänger gehabt. Ihm folgten Scheiner[4], Plempius[5], Sturm[6], Conradi[7], Porterfield[8], Plattner[9], Jacobson[10], Brewster[11], J. Müller[12], Moser[13], Burow[14], Ruete[15], William Clay Wallace[16], C. Weber[17]. Die meisten dieser Männer hielten es für wahrscheinlich, daß der Ciliarkörper durch willkürlich hervorgebrachte Zusammenziehungen die Linse vor- und rückwärts bewegen könne. Um bei der Berechnung der Größe, um welche die Linse verschoben werden müßte, um das Auge zu akkommodieren, nicht unmögliche Größen zu finden, war man gezwungen, der Hornhaut eine größere, der Linse eine geringere Brennweite beizulegen, als diese Teile wirklich besitzen. Unterstützt wurde diese Ansicht in neuerer Zeit auch namentlich durch Beobachtungen am lebenden Auge, welche bewiesen, daß die Pupille sich beim Nahesehen der Hornhaut nähert. Bei Vögeln hat Bidloo[18] schon die stärkere Wölbung der Iris beim Nahesehen bemerkt, was für den Menschen später Hueck[19], Burow[20] und Ruete bestätigten. C. Weber zeigte auf mechanischem Wege, daß bei Hunden die Vorderfläche der Linse sich nach vorn bewegt, sobald der vordere Teil des Auges durch elektrische Ströme gereizt wird. Er machte zu dem Ende an dem Auge eines lebenden, durch Opium betäubten Hundes in der Mitte der Cornea eine runde Öffnung, führte ein passend befestigtes Stäbchen ein, bis es die vordere Fläche der Linse berührte. Das andere Ende des Stäbchens stützte sich gegen den kürzeren Arm eines Fühlhebels, der das Vordrängen der vorderen Linsenfläche in vergrößertem Maßstabe anzeigte.

Hannover[21] nahm dagegen die Möglichkeit an, daß die Linse in ihrer Kapsel sich nach vorn und hinten bewegen könnte, wozu ihr der sogenannte *Liquor Morgagnii* Platz lassen sollte. Daß eine solche Flüssigkeit in der normalen Linsenkapsel nicht existiert, ist schon erwähnt worden.

5. Ansichten, welche eine Formveränderung der Linse annehmen. Diese Annahme, welche sich endlich als die richtige erwiesen hat, wurde ebenfalls schon sehr früh gemacht und von vielen verteidigt, ohne daß sie aber das Stattfinden einer solchen Veränderung durch wirkliche Beobachtungen hätten erweisen können.

[1] *C. R. de l'Acad. d. Sciences.* 1847. Okt. p. 501.
[2] Spezielle Gewebelehre des Auges. Breslau 1842.
[3] Dioptrice. Propos. 64.
[4] Oculus. Oeniponti 1619. Lib. III. p. 163.
[5] Ophthalmographia. Lovanii 1648. B. III.
[6] Dissertatio visionem ex obscurae camerae tenebris illustrans. Altdorfii 1693. p. 172.
[7] Frorieps Notizen. Bd. 45.
[8] *On the eye.* Edinburgh 1759. Vol. I. p. 450.
[9] De motu ligamenti ciliaris. Lipsiae 1738. p. 5.
[10] Suppl. ad. Ophthalm. Copenh. 1821.
[11] *Edinb. Journal of Science.* I. 77. — Poggendorffs Ann. II. 271.
[12] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinns. Leipzig 1826. S. 212.
[13] Repertor. d. Physik. Berlin 1844. Bd. V. S. 364.
[14] Beiträge zur Physiol. u. Physik des menschl. Auges. Berlin 1842.
[15] Lehrbuch der Ophthalmologie.
[16] *The accommodation of the eye to distances.* Newyork 1850.
[17] Disquisitiones quae ad facultatem oculum accommodandi spectant. Marburgi 1850. p. 31.
[18] Observ. de oculis et visu variorum animalium. Lugd. Bat. 1715.
[19] Bewegung der Kristallinse. S. 60.
[20] Beiträge zur Physiol. usw. S. 136.
[21] Bidrag til Øjets Anatomie. Kjöbenhavn 1850. p. 111.

Der erste war DESCARTES[1], es folgten PEMBERTON[2], CAMPER[3], HUNTER[4], TH. YOUNG[5], PURKINJE[6], GRAEFE[7], TH. SMITH[8], HUECK[9], STELLWAG VON CARION[10], FORBES[11]. Ältere Anatomen, wie LEEUWENHOEK, PEMBERTON, nannten die Linse deshalb auch wohl *Musculus crystallinus*, weil sie voraussetzten, daß ihre Fasern kontraktil seien. TH. YOUNG stützte diese Ansicht auf Versuche, welche nicht jedem Auge gelingen, für ihn selbst aber vollständig beweisend waren. Wenn man durch ein feines Gitter von geraden Drähten das Zerstreuungsbild eines Lichtpunktes betrachtet, ist das Bild von geraden dunklen Linien, Schattenbildern der Drähte, durchzogen. Diese waren vollständig gerade, wenn YOUNGS Auge für die Ferne akkommodiert war, an den Seiten des Zerstreuungskreises dagegen nach außen konvex, wenn er in die Nähe sah. Die Erscheinung blieb dieselbe, wenn er das Auge unter Wasser brachte, und so den Einfluß der Hornhaut eliminierte. Die Krümmung der vorher geraden Schattenlinien konnte nur durch eine veränderte Krümmung der Linsenflächen bedingt sein. Zur Ausführung des Versuchs gehört eine weite Pupille. WOLLASTON konnte die Erscheinung nicht sehen (auch Referent nicht), wohl aber ein anderer Freund YOUNGS, KOENIG. Dementsprechend fand YOUNG mittels seines Optometers, daß beim Sehen durch vier nebeneinander liegende Spalten die vier Bilder des Fadens sich in einem Punkte schnitten, wenn er für die Ferne, aber nicht, wenn er für die Nähe akkommodierte.

Die Veränderung der Linsenreflexe bei Akkommodationsänderungen beobachtete zuerst MAX LANGENBECK[12], und schloß auch richtig daraus, daß die vordere Linsenfläche beim Nahesehen gewölbter wird. Seine Beobachtungsweise ist aber ungünstig, indem er den Beobachteten direkt in die Flamme blicken ließ, wobei die drei Spiegelbildchen dem Beobachter sehr nahe aneinander zu stehen scheinen, und das überwiegend helle Hornhautbild die Wahrnehmung der beiden anderen erschwert. Dies mag der Grund sein, weshalb LANGENBECKS Beobachtung die Aufmerksamkeit der Physiologen nicht erregte. CRAMER beobachtete dasselbe, verbesserte aber die Methode der Beobachtung namentlich dadurch, daß er die Lichtstrahlen von der Seite her in das Auge fallen und den Beobachter von der anderen Seite hineinblicken ließ. Auch beschrieb er ein Instrument, welches er Ophthalmoskop nannte, um die Beobachtungen leichter und sicherer zu machen. Es ist dies im wesentlichen ein Gestell, an welchem eine Lampe, ein Fadenkreuz als Gesichtszeichen, ein Mikroskop von ungefähr 10 bis 20 maliger Vergrößerung und ein hohles kegelförmiges Stück mit den nötigen Ausschnitten, an welches der Beobachtete sein Auge fest anlegt, angebracht sind. Der Beobachter stellt die Flamme so, daß er durch das Mikroskop in der Pupille des beobachteten Auges den Reflex der mittleren Linsenfläche zwischen den beiden anderen Reflexen erscheinen sieht. Indessen ist die wesentlichste Tatsache, die Verkleinerung des von der vorderen Linsenfläche entworfenen Bildes, auf diese Weise nicht so bequem zu beobachten, als wenn man das Spiegelbild von zwei leuchtenden Punkten mit bloßem Auge beobachtet, wie ich es oben beschrieben habe. Die Verschiebung des Reflexes der vorderen Linsenfläche dagegen, welche durch CRAMERS Ophthalmoskop leicht und sicher zu beobachten ist, ist wegen der von CRAMER noch

[1] CARTESIUS, Dioptrice. Lugd. Bat. 1637.
[2] Dissert. de facultate oculi, qua ad diversas distantias se accommodat. Lugd. Bat. 1719.
[3] Dissert. physiol. de quibusdam oculi partibus. Lugd. Bat. 1746. p. 23.
[4] *Philosoph. Transact.* 1794. p. 21.
[5] Ibid. 1801. P. I. p. 53.
[6] Beobachtungen u. Versuche zur Physiol. d. Sinne. Berlin 1825.
[7] REILS Archiv für Physiologie. Bd. IX. S. 231.
[8] *Philosophical Magazine.* 1833. T. V. 3. No. 13. — SCHMIDTS Jahrbücher. 1834. Bd. I. S. 6.
[9] Bewegung der Kristallinse. Leipzig 1841.
[10] Zeitschrift der k. k. Gesellschaft der Ärzte zu Wien. 1850. Heft 3 u. 4.
[11] *Comptes rendus.* XX. p. 61.
[12] Klinische Beiträge. Göttingen 1849.

nicht gekannten Asymmetrie des Auges für sich allein nicht beweisend, wenn man sich nicht, was leicht auszuführen ist, durch eine Reihe von Versuchen überzeugt, daß von jeder Stelle der Pupille aus das genannte Bild sich stets der Mitte der Pupille nähert.

Ohne von den beiden genannten Forschern zu wissen, und zu einer Zeit, wo CRAMERS Entdeckung erst durch kurze Notizen[1], die er selbst und DONDERS gegeben hatte, veröffentlicht war, ehe noch seine von der Holländischen Gesellschaft der Wissenschaften gekrönte Abhandlung erschienen war, fand ich selbst dieselbe Tatsache[2], und ermittelte weiter dasjenige, was ich oben über das Verhalten der hinteren Fläche der Linse bei der Akkommodation angeführt habe[3].

Gegen die Abhängigkeit des Akkommodationsvermögens von Verschiebungen und Formänderungen der Linse wurden vielfach Fälle geltend gemacht, in denen das Auge sich noch sollte akkommodieren können, nachdem die Linse durch die Staroperation entfernt war. Indessen ist dabei zu bedenken, daß die Kranken auch bei unpassender Akkommodation aus Zerstreuungsbildern mancherlei erkennen können. Daß jemand, der mit der Starbrille Druckschrift liest, mit derselben Brille auch ferne Menschen, Fensterkreuze und dergleichen erkennen kann, berechtigt noch nicht, ihm Akkommodationsvermögen zuzuschreiben. Ein jeder kann sich leicht überzeugen, daß, wenn er einen Finger in etwa 1 Fuß Entfernung fixiert, er dabei doch eine Menge Einzelheiten an weit entfernten Gegenständen wahrnehmen kann. Zum Beweis des Vorhandenseins von Akkommodation gehört, daß der Kranke mit derselben Brille einen Gegenstand in bestimmter Entfernung willkürlich deutlich und undeutlich sehen kann, je nachdem er sein Auge für dieselbe oder eine andere Entfernung einzurichten strebt. SZOKALSKY will einen solchen Fall wirklich beobachtet haben; aber das betreffende Auge konnte ohne Starbrille in 17 Zoll Entfernung deutlich sehen, was ohne Ersatz der Linse nicht möglich ist. Um bei operierten Augen während des Lebens zu erkennen, ob die Linse hergestellt sei, schlägt DONDERS vor, die entoptischen Erscheinungen zu benutzen.

6. Ansichten, welche eine Formveränderung des Augapfels annehmen. Wenn die Netzhaut sich von den brechenden Flächen entfernen, der Augapfel sich also verlängern könnte, würde das Auge sich dadurch für die Nähe akkommodieren. Die Anhänger dieser Ansicht nahmen meistenteils an, daß die Augenmuskeln, entweder die rechten allein, oder die schiefen allein, oder alle zusammen, oder auch der Schließmuskel der Augenlider, durch Druck auf den Augapfel dessen Gestalt verändern könnten. Hierzu gehören STURM[4], LE MOINE[5], BUFFON[6], BOERHAVE[7], MOLINETTI[8], OLBERS[9] HAESELER[10], WALTHER[11], MONRO[12], HIMLY[13], MECKEL[14], PARROT[15],

[1] Tijdschrift der Maatschappij vor Geneeskunde. 1851. W. 11. bl. 115 und Nederlandsch Lancet. 2. Serie. W. 1 bl. 529. 1851—52.

[2] Monatsberichte der Berliner Akad. 1853. Februar. S. 137.

[3] GRAEFES Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abt. II. S. 1—74.

[4] Dissert. de presbyopia et myopia. Altdorfii 1697.

[5] Quaestio an obliqui musculi retinam a crystallino removeant. Parisiis 1743.

[6] *Histoire naturelle.* Paris 1749. T. III. p. 331.

[7] Praelectiones academ. Taurini 1755. Vol. III. p. 121.

[8] HALLER, Elementa Physiologiae. 1763. T. V. p. 511.

[9] Dissert. de oculi mutat. int. Gottingae 1780. § 43.

[10] Betrachtungen über das menschliche Auge.

[11] Dissert. de lente crystallina. § 1.

[12] Altenburger Annalen f. d. J. 1801. S. 97.

[13] Ophthalmologische Beobachtungen und Untersuchungen. Bremen 1801.

[14] CUVIER, Vorlesungen über vergl. Anat. Übers. von MECKEL. Leipzig 1809. Bd. II. S. 369.

[15] *Entretiens sur la physique.* Dorpat 1820. T. III. p. 434.

Poppe[1], Schroeder van der Kolk[2], Arnold[3], Serre[4], Bonnet[5], Henle[6], Szokalsky[7], Listing[8]. Daß die Augenmuskeln nicht nur die Form des Augapfels ändern können, sondern auch mittelbar die Hornhaut gewölbter machen und die Linse nach vorn verschieben, nimmt Clavel[9] an. Die Gründe, aus denen eine solche Gestaltänderung des Augapfels unwahrscheinlich erscheint, habe ich schon oben angeführt.

Die angeführten Ansichten sind die wichtigeren, welche über diesen schwierigen Gegenstand aufgestellt worden sind; daneben wurden von einzelnen noch mancherlei andere Erklärungsweisen hervorgesucht, welche sich mit Recht geringeren Beifalls zu erfreuen hatten. Ich erwähne v. Grimm[10], welcher annahm, das Brechungsvermögen der Augenmedien könnte sich ändern; Weller[11], welcher die Akkommodation nicht durch eine Veränderung des Auges, sondern durch einen psychischen Prozeß erklären wollte usw.

Literatur.

1611. Kepler, Dioptrice. Propos. 26.
1619. Scheiner, Oculus. Oeniponti 1619. Lib. III. p. 163.
1637. Cartesius, Dioptrice. Lugd. Batav.
1648. V. F. Plempius, Ophthalmographia. Lovanii. B. III.
1685. De la Hire, *Journal des Sçavans*. 1685. p. 398.
1693. Sturm, Dissertatio visionem ex obscurae camerae tenebris illustrans. Altdorfii. p. 172.
1697. Sturm, Dissert. de presbyopia et myopia. Altdorfii.
1712. A. F. Walther, Diss. de lente crystallina oculi humani. Lipsiae. Auch in Haller, Disput. anat. Vol. IV.
1715. Bidloo, Observationes de oculis et visu variorum animalium. Lugd. Batav.
1719 Pemberton, Dissert. de facultate oculi, qua ad diversas distantias se accommodat. Lugd. Batav.
1738. J. J. Platner, De motu ligamenti ciliaris in oculo. Lipsiae. p. 5.
1742. J. P. Lobé (Albinus), Diss. de oculo humano. Lugd. Batav. p. 119. Auch in Haller, Disput. anat. Vol. VII.
1743. Haller, Elementa Physiologiae. T. V. p. 516.
Le Moine, Quaestio an obliqui musculi retinam a crystallino removeant. Paris.
1746. P. Camper, Dissert. physiologica de quibusdam oculi partibus. Lugd. Batav. p. 23. Auch in Haller, Disput. anat. Vol. IV.
1749. Buffon, *Histoire naturelle*. Paris. T. III. p. 331.
1755. Le Roy, *Mémoires de l'Acad. de Paris*. 1755. p. 594.
Boerhave, Praelectiones academicae, edit. et not. add. Alb. a Haller. Taurini. Vol. III. p. 121.
1758. v. Grimm, Diss. de visu. Gottingae.
1759. Porterfield, *On the eye*. Edinburgh. Vol. I. p. 450. — *Edinb. med. Essays*. Vol. IV. p. 124.
1763. Molinetti in Haller, Elementa physiologiae V. p. 511.
1783. Olbers, Diss. de oculi mutationibus internis. Gottingae.
1793. Th. Young, *Observations on vision*. *Phil. Trans.* 1793. P. II. p. 169.

[1] Die ganze Lehre vom Sehen. Tübingen 1823. S. 153.
[2] Luchtmans, Diss. de mutatione axis oculi. Traject. ad Rhenum 1832.
[3] Untersuchungen über das Auge des Menschen. Heidelberg 1832. S. 38.
[4] *Bulletin de thérapie*. 1835. T. 8. L. 4.
[5] Frorieps N. Notizen. 1841. S. 233.
[6] Canstatts Jahresbericht für 1849. Bd. I. S. 71.
[7] Archiv für physiologische Heilkunde. VII. 1849. 7.—8. Heft.
[8] Wagners Handwörterbuch d. Physiologie. IV. 498.
[9] *Comptes rendus*. XXXIII. p. 259.
[10] Dissert. de visu. Gottingae 1758. S. auch Olbers, de oculi mutationibus internis. p. 29.
[11] Diätetik für gesunde und schwache Augen. Berlin 1821. S. 225.

1794. HUNTER, *Phil. Trans.* 1794. p. 21.
1795. HOME, *Phil. Trans.* 1795. P. I. p. 1. (Akkommodation nach Staroperation.)
1796. HOME, *Phil. Trans.* 1796. P. I. p. 1.
TH. YOUNG, De corporis humani viribus conservatricibus. Gottingae. — *Phil. Transact. for* 1800, p. 146.
1797. KLÜGEL in REILS Archiv. Bd. II. S. 51. (Gegen HOME.)
1801. MONRO, Altenburger Annalen f. d. J. 1801. S. 97.
HIMLY, Ophthalmologische Beobachtungen und Untersuchungen. Bremen.
*TH. YOUNG, *On the mechanisme of the eye. Phil. Trans.* 1801. P. I. p. 23*. (Eine Arbeit von bewunderungswürdigem Scharfsinn und Erfindungskraft, welche vollständig geeignet war, schon zu ihrer Zeit den Streit über die Akkommodation zu entscheiden, aber durch ihre Kürze oft schwer verständlich wird, und außerdem die vollständigste Kenntnis der mathematischen Optik voraussetzt.)
1802. HOME, *Phil. Trans.* 1802. P. I. p. 1. (Adaptation bei Staroperierten.)
ALBERS, Beiträge zur Anatomie und Physiologie der Tiere. Heft I. Bremen.
1804. GRAEFE in REILS Archiv für Physiologie. Bd. IX. S. 231.
1809. CUVIER, Vorlesungen über die vergleichende Anatomie, übers. von MECKEL. Leipzig. Bd. II. S. 369.
1811. WELLS, *Phil. Trans.* 1811. P. II. Auch in GILBERTS Annalen XLIII. 129 u. 141.
1816. MAGENDIE, *Précis élémentaire de Physiologie* I. p. 73. Paris. Übers. von ELSÄSSER. Tübingen 1834. I. 54.
1820. G. PARROT, *Entretiens sur la physique.* Dorpat. T. III. p. 434.
1821. JACOBSON, Suppl. ad Ophthalm. Copenhagen.
C. H. WELLER, Diätetik für gesunde und schwache Augen. Berlin. S. 225.
1823. J. POPPE, Die ganze Lehre vom Sehen. Tübingen. S. 153.
RUDOLPHI, Grundriß der Physiologie. Berlin. Bd. II. Abt. 1. S. 9.
LEHOT, *Nouvelle théorie de la vision.* Paris.
PURKINJE, De examine physiologico organi visus et systematis cutanei. Vratislaviae. (Entdeckung der Linsenreflexe.)
1824. BREWSTER, *Edinb. Journal of Science* I. p. 77. — POGGENDORFF, Annalen II. S. 271.
SIMONOFF in MAGENDIE, *Journal de Physiologie.* T. IV.
1825. PURKINJE, Beobachtungen und Versuche zur Physiol. der Sinne. Berlin. S. 128*.
1826. J. MÜLLER, Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig. S. 212.
HUECK, Diss. de mutationibus oculi internis. Dorpati.
MILE in MAGENDIE, *Journal de Physiologie* VI. p. 166.
1828. TREVIRANUS, Beiträge zur Anatomie und Physiologie der Sinneswerkzeuge des Menschen und der Tiere. Heft I.
1831. MORTON in *American Journal of med. Sciences.* 1831. Nov.
1832. RITTER in GRAEFE u. WALTHERS Journal. VIII. S. 347.
FR. ARNOLD, Untersuchungen über das Auge des Menschen. Heidelberg. S. 38.
G. J. LUCHTMANS, Diss. de mutatione axis oculi secundum diversam distantiam objecti ejusque causa. Traject. ad Rhenum.
1833. TH. SMITH, *Philos. Magazine* V. 3. No. 13. — SCHMIDTS Jahrbücher der Medizin. 1834. Bd. I. S. 6.
1834. DUGÈS, *Institut.* Nr. 73.
1835. SERRE, *Bulletin de Thérapie.* T. VIII. L. 4.
1836. VOLKMANN, Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinns. S. 109.
R. K. KOHLRAUSCH über TREVIRANUS' Ansichten vom deutlichen Sehen in der Nähe und Ferne. Rinteln.
1837. SANSON, *Leçons sur les maladies des yeux, publiées par* BARDINOT *et* PIGNE. Paris. (Über die Reflexe der Kristallinse.)
MILE in POGGENDORFFS Annalen XLII. S. 37 u. 235.
1838. PASQUET in FRORIEPS Notizen. Bd. VI. Nr. 2.
1839. J. F. FRIES, Über den optischen Mittelpunkt im menschlichen Auge, nebst allgemeinen Bemerkungen über die Theorie des Sehens. Jena. S. 27.
1840. NEUBER in OSANNS Zeitschrift. Heft 7—12. S. 42.
1841. HUECK, Die Bewegung der Kristallinse.
BONNET in FRORIEPS Neue Notizen. 1841. S. 233.
1842. HALDAT in *Comptes rendus.* 1842.
ADDA in *Annales de Chimie et de Phys.* Ser. III. T. XII. p. 94.

1842. Burow, Beiträge zur Physiol. u. Physik des menschl. Auges. S. 94—177*.
S. Pappenheim, Die spezielle Gewebelehre des Auges. Breslau.
1844. Moser, Repertor. d. Physik V. S. 364.
1845. Sturm, *Sur la théorie de la vision. Comptes rendus.* XX. p. 554, 761, 1238; Poggendorffs Annalen LXV. 116.
Forbes, *Comptes rendus.* XX. p. 61; *Institut.* No. 576. p. 15; No. 578. p. 32.
de Haldat, *Comptes rendus.* XX. p. 458 u. 1561; *Institut.* No. 596. p. 90 (gegen Forbes).
1846. Donders in Rüete, Leerboek der Ophthalmologie. bl. 110.
H. Meyer in Henle u. Pfeuffer, Zeitschrift für rationelle Medizin. Bd. V. (Ursprung der Linsenreflexe.)
Senff in R. Wagners Handwörterbuch der Physiologie, Art.: Sehen von Volkmann. S. 303.
Besio, *Giorn. Arcad.* CV. 3; *Institut.* No. 666. p. 338.
J. G. Crahay, *Bulletin de Bruxelles.* XII. 2. 311; *Institut.* No. 644. p. 151.
1847. L. L. Vallée, *Comptes rendus.* XXV. p. 501.
1848. Valentin, Lehrbuch der Physiologie. Bd. II. Abt. 2. S. 122.
Szokalsky in Griesinger, Archiv für physiol. Heilkunde. VII. S. 694.
1849. Max. Langenbeck, Klinische Beiträge aus dem Gebiete der Chirurgie und Ophthalmologie. Göttingen.
Donders in Nederlandsch Lancet. 1849. bl. 146.
1850. Jos. Engel, Prager Vierteljahrsschrift XXV. S. 167 u. 208.
H. Mayer, ebenda Bd. XXVIII. Außerord. Beilage, und Bd. XXXII. S. 92*.
Henle in Canstatts Jahresbericht für 1849. Erlangen. S. 71.
William Clay Wallace, *The accommodation of the eye to distances.* Newyork.
C. Weber, Nonnullae disquisitiones quae ad facultatem oculum rebus longinquis et propinquis accommodandi spectant. Marburgi.
C. Stellwag von Carion, Wiener Zeitschrift der Ges. der Ärzte. VI. S. 125. 138.
A. Hannover, Bidrag til Öiets Anatomie, Physiologie og Pathologie. Kjöbenhavn. p. III.
1851. H. Helmholtz, Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge. Berlin. S. 37*.
Listing in R. Wagners Handwörterbuch der Physiologie. Art.: Dioptrik des Auges. Bd. IV. S 498*.
Cramer, Tijdschrift der Maatschappij vor Geneeskunde. 1851. W. 11. bl. 115; Nederlandsch Lancet. Ser. 2. W. 1. bl. 529.
Clavel, *Comptes rendus.* XXXIII. p. 259; *Archives des sciences phys. et natur.* XIX. p. 76.
1852. Donders, Nederl. Lancet. 1852. Febr. bl. 529.
1853. H. Helmholtz, Monatsberichte d. Akad. zu Berlin. Febr. S. 137.
*A. Cramer, Het Accommodatievermogen der Oogen physiologisch toegelicht. Haarlem. Übersetzt von Doden. Leer 1855.
L. und A. Fick in J. Müllers Archiv für Anat. u. Physiol. 1853. p. 449*.
1854. Donders in Onderzoekingen gedaan in het Physiologisch Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. p. 61.
J. Czermak in Prager Vierteljahrsschrift XLIII. S. 109.
1855. *H. Helmholtz, Über die Accommodation des Auges in v. Graefe, Archiv für Ophthalmologie. Bd. I. Abt. II. S. 1.

Nachtrag.

Hinsichtlich der Erscheinungen, die mit dem Mechanismus der Akkommodation in Verbindung stehen, ist ein Versuch von Bahr hier zu erwähnen. Derselbe betrachtete im Zustande der Akkommodation ein nahes scharf beleuchtetes Rechteck, bis ein kräftiges Nachbild in seinem Auge entwickelt war, und warf dieses dann mit nachlassender Akkommodation auf eine ferne Fläche, auf der er die scheinbare Größe des Nachbildes bestimmte. Da nun die Größe des Bildes auf der Netzhaut proportional ist dem Abstande der Netzhaut vom

hinteren Knotenpunkte des Auges, und die Größe des Netzhautbildes in beiden Beobachtungen dieselbe war, so läßt sich aus einem solchen Versuche berechnen, in welchem Verhältnis sich der Abstand der Netzhaut vom zweiten Knotenpunkte ändert. BAHR fand aus seinen Versuchen eine Verschiebung des Knotenpunkts nach vorn um 0,35 mm.; meine auf Seite 128 angestellte Berechnung ergibt 0,4. Fände eine Verlängerung des Augapfels statt, so müßte die Veränderung jener Entfernung viel bedeutender sein, und wenn eine solche Verlängerung der einzige Grund der Akkommodation wäre, bis zu 3 mm betragen, was demnach, wie auch diese Versuche von BAHR zeigen, nicht der Fall sein kann.

KNAPP[1] hat an vier individuellen Augen die Lage des Fernpunkts und Nahepunkts, die Krümmung und Lage der Hornhaut und der Linsenflächen beim Sehen für die Ferne, wie bei der Akkommodation für die Nähe bestimmt und gefunden, daß die aus den Krümmungsänderungen der Kristallinse berechnete Akkommodation hinreichend gut mit der wirklich stattfindenden Akkommodationsbreite übereinstimmte, so daß die Annahme einer Verlängerung des Auges hierdurch ausgeschlossen war.

DONDERS[2] hat sich in zwei für die Untersuchung sehr günstigen Fällen, wo die Linse durch Staroperation entfernt war, überzeugt, daß in solchen Augen, welche natürlich nur mit Hilfe einer vorgesetzten Konvexlinse deutlich sehen können, keine Spur von Akkommodation vorhanden ist, trotzdem bei dem Bestreben, nahe Objekte zu sehen, Konvergenz und Verengerung der Pupille eintrat. Wäre eine Verlängerung des Augapfels durch den Druck der Augenmuskeln möglich, so würde eine solche auch bei Augen ohne Linse eine gewisse Breite der Akkommodation bewirken können. Es bleibt nach allen diesen Tatsachen wohl nicht zweifelhaft, daß eine Verlängerung des Augapfels bei der Akkommodation für die Nähe nicht stattfindet.

Die Messung der Krümmungen der Kristallinse kann viel schärfer, als nach den oben beschriebenen Methoden, mit dem Ophthalmometer ausgeführt werden, wenn man in einer dunkeln Kammer Sonnenlicht anwendet, um die Linsenreflexe hervorzubringen, wie es B. ROSOW getan hat.

Was nun die Muskeln betrifft, welche die Formänderung der Linse hervorbringen, so ist zunächst zu bemerken, daß Fälle beobachtet worden sind, in denen die Iris wirkungslos war und doch vollständig genügende Akkommodation stattfand. Ich selbst habe einen Astronomen gesehen, bei dem also optische Versuche leicht anzustellen waren und der die Erscheinungen, auf die es ankam, wohl kannte, bei welchem eine vollständige Lähmung der Iris eingetreten war und der doch vollkommen gut akkommodierte. Ferner hat A. v. GRAEFE[3] bei einem Arbeiter, dem imfolge einer Verletzung des Auges die Iris vollständig entfernt worden war, nach der Heilung vollkommen gute Akkommodation gefunden.

Es bleibt also nur der Ciliarmuskel, dem wir die Akkommodation zuschreiben können. In diesem ist nun zunächst durch VAN REEKEN, bestimmter durch H. MUELLER und ROUGET eine Schicht zirkular verlaufender Fasern entdeckt worden, welche in dem gegen die Ciliarfortsätze hin gewendeten Winkel

---

[1] Archiv für Ophthalmol. IV, 2, p. 1—52.
[2] *On the anomalies of accommodation and refraction.* London. p. 320—321.
[3] Archiv für Ophthalmologie. VII, 2, p. 150—161.

des Muskels liegen, übrigens mit längs verlaufenden Fasern durchflochten sind, und auch vielfältig sich bogenförmig umbiegen und in Längsfasern übergehen, so daß aus dieser anatomischen Anordnung der Zirkularfasern zunächst wohl zu schließen ist, daß die Zirkularfasern des Ciliarmuskels mit den Längsfasern desselben nur zusammen wirken können. Für die Wirkung auf die Zonula ist eine solche Anordnung der Muskelfasern offenbar sehr günstig; denn hätten wir lauter Radialfasern im Muskel, wie er in den älteren Beschreibungen geschildert wurde, so würde die nach innen sehende Ecke des Muskels eingezogen worden sein, die Zonula würde eine Ausbiegung, konvex gegen den SCHLEMMschen Kanal (Fig. 63 *s*) hin bekommen haben, und dabei viel weniger erschlafft sein als bei der bestehenden Einrichtung, wo eine solche Ausbiegung vermieden wird. Die Zirkularfasern des Muskels nämlich müssen die entsprechende Kante des Muskels gegen die Spitze der Ciliarfortsätze und gegen den Linsenrand hin hervorziehen und dadurch bewirken, daß auch der mittlere Teil der Zonula in Richtung ihrer Faltenränder gegen den Linsenrand verschoben wird, ohne dabei nach außen gegen den SCHLEMMschen Kanal hin gezogen zu werden.

Ob, wie H. MUELLER annimmt, die Zirkularfasern des Ciliarmuskels einen Druck auf die Ciliarfortsätze ausüben und dieser sich fortpflanzt auf den Linsenrand, ist schwer zu beurteilen, da wir nicht wissen, ob die Ciliarfortsätze im lebenden Auge prall genug mit Blut gefüllt sind, um einen merklichen Druck auf die Linse auszuüben, und viele Ophthalmologen es überhaupt als zweifelhaft betrachten, daß sie die Linse auch nur berühren.

W. HENKE hat angenommen, daß nur die Zirkularfasern des Ciliarmuskels die Akkommodation für die Nähe bewirken, dagegen die Längsfasern durch ihre Spannung wieder die Akkommodation für die Ferne zurückführen sollen. Er betrachtet dabei die beiden Ansätze der Längsfasern des Muskels als fest, glaubt, derselbe würde bogenförmig nach innen gezogen durch die Wirkung der Ringfasern und strecke sich, wenn die Akkommodation nachläßt, durch aktive Spannung wieder gerade, indem er die Ringfasern wieder ausdehnt. Ich halte eine solche Wirkungsweise für sehr unwahrscheinlich, erstens aus allen den Gründen, welche gegen eine aktive Akkommodation für die Ferne sprechen, zweitens weil die Faserschichten des Ciliarmuskels zu sehr verflochten sind und sogar Längsfasern in Ringfasern und Ringfasern in Längsfasern übergehen. Dabei ist eine isolierte Wirkung der einzelnen Fasern kaum zu begreifen. Das von HENKE dagegen angeführte Beispiel der Iris ist nach den neueren Untersuchungen über den *Dilatator Iridis* von sehr zweifelhaftem Werte. Ferner scheinen mir sowohl das *Ligamentum pectinatum* als vorderer Ansatzpunkt, wie auch die Aderhaut als hinterer Ansatzpunkt des Muskels viel zu nachgiebig zu sein, um eine erhebliche Wirkung des Muskels in HENKEs Sinne bei so ungünstiger Zugrichtung zuzulassen. Endlich müßte sich nach HENKEs Vorstellung bei der Akkommodation für die Nähe die äußere Fläche des Muskels von der Sklera abheben und bei der für die Ferne wieder anlegen. Es ist aber nicht abzusehen, wo eine Flüssigkeit herkommen soll, die den leeren Raum dieser Spalte ausfüllen könnte, und wenn eine solche nicht da wäre, würde der Luftdruck jede Nachgiebigkeit des Muskels verhindern.

Ich muß gestehen, daß mir noch immer die oben auf Seite 127 gegebene Ansicht vom Mechanismus der Akkommodation am wahrscheinlichsten erscheint; Versuche, die ihre Richtigkeit zu erweisen scheinen, sind soeben von C. VÖLCKERS und V. HENSEN angekündigt worden.

1855. Ruete, De Irideremia congenita. Progr. acad. Leipzig. Virchows Archiv. XII. 342.
— van Reeken. Ontleedkundig Onderzoek. van den toestel voor accommodatie van het oog. Onderzoekingen gedaan in het Physiol. Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar. VII, 248—286.
1856. J. P. Maunoir, *Mémoire sur l'ajustement de l'oeil aux différentes distances. Arch. des sciences phys.* XXXI, 309—316.
— Breton, *Adaptation de la vue aux différentes distances, obtenue par une compression mécanique, exercée sur le globe oculaire. C. R.* XLIII, 1161—1162. *Inst.* 1856. p. 455. *Cosmos.* IX, 690. X, 29—30.
— Goodsir, *Notice respecting recent discoveries on the adjustment of the eye to distinct vision. Proc. of Edinb. Soc.* III, 343—345. *Edinb. J.* (2) III, 339—342.
1857. Stoltz, *Accommodation artificielle ou mécanique de l'oeil à toutes les distances, C. R.* XLIV, 388—390; 618—620. *Arch. des sciences phys.* XXXV, 139. *Cimento* VI, 154—155. *Cosmos.* X, 320—321.
— Bahr, De oculi accommodatione experimenta nova. Dissertat. Berlin.
— H. Müller, Über einen ringförmigen Muskel am Ciliarkörper. Archiv für Ophthalm. III, 1, IV, 2. S. 277—285.
1859. J. Mannhardt, Bemerkungen über den Akkommodationsmuskel und die Akkommodation. Ebenda. IV, 1. S. 269—285.
— Ch. Archer, *On the adaptation of the human eye to varying distances. Phil. Mag.* (4) XVII, 224—225.
— Respighi, *Sull' accommodamento dell'occhio humano per la visione distinta. Mem. di Bologna.* VIII, 355—389. Zeitschr. für Chemie. 1859. S. 10—18.
— Magni, *Dell'addattamento dell'occhio umano alla visione distinta. Cimento* X, 12—20.
1860. J. H. Knapp, Über die Lage und Krümmung der Oberflächen der menschlichen Kristallinse und den Einfluß ihrer Veränderungen bei der Akkommodation auf die Dioptrik des Auges. Archiv für Ophthalmol. VI, 2, S. 1—52. VII, 2, S. 136—138.
1860. W. Henke, Der Mechanismus der Akkommodation für Nähe und Ferne. Ebenda. VI, 2, S. 53—72.
— L. Happe, Die Bestimmungen des Sehbereichs und dessen Korrektion, nebst Erläuterungen über den Mechanismus der Akkommodation. Braunschweig 1860.
1861. A. v. Graefe, Fall von acquirierter Aniridie als Beitrag zur Akkommodationslehre. Archiv für Ophthalmol. VII, 2, S. 150—161.
1863. O. Becker, Lage und Funktion der Ciliarfortsätze im lebenden Menschenauge. Wiener Medic. Jahrbücher. 1863.
1864. E. Förster, Zur Kenntnis des Akkommodationsmechanismus. Sitzungsber. d. Ophthalmol. Ges. Erlangen, S. 75—86. Klinische Monatsbl. für Augenheilk. Sept. bis Dez. 1864.
1865. B. Rosow, Zur Ophthalmometrie. Archiv für Ophthalmol. XI, 2, S. 129—134.
— Mandelstamm, Zur Ophthalmometrie. Ebenda. XI, 2, S. 259—265.

§ 13. Von der Farbenzerstreuung im Auge.

Daß die Lichtstrahlen, welche von einem gesehenen leuchtenden Punkte ausgegangen sind, durch die brechenden Mittel des Auges wieder in einen Punkt vereinigt werden, ist nur annähernd richtig. Wir wenden uns jetzt zum Studium der Abweichungen von dem genannten Gesetze, und wollen zunächst die chromatische Abweichung betrachten, welche daher entsteht, daß die Lichtstrahlen von verschiedener Schwingungsdauer auch verschiedene Brechbarkeit in tropfbaren und festen durchsichtigen Mitteln haben. Da die Größe der Brennweiten gekrümmter brechender Flächen von dem Brechungsverhältnisse abhängig ist, so liegen die Vereinigungspunkte von Strahlen verschiedener Farbe bei Systemen solcher Flächen im allgemeinen an verschiedenen Orten, und nur durch besondere Kombinationen verschiedenartiger brechender Mittel läßt es sich erreichen, daß die Brennpunkte verschiedenfarbiger Strahlen in optischen Apparaten zusammenfallen, so daß diese dadurch achromatisch werden.

Das Auge ist nicht achromatisch, obgleich beim gewöhnlichen Sehen die Farbenzerstreuung sich fast gar nicht merklich macht. Daß der brechende Apparat des Auges verschiedene Brennweiten für verschiedenfarbige einfache Strahlen habe, zeigte Fraunhofer folgendermaßen. Er beobachtete ein prismatisches Spektrum durch ein achromatisches Fernrohr, in dessen Okulare ein sehr feines Fadenkreuz angebracht war, und bemerkte, daß er die Okularlinse dem Fadenkreuze näher schieben mußte, um dies deutlich sehen zu können, wenn er den violetten Teil des Spektrums im Gesichtsfelde hatte, als wenn er den roten betrachtete. Indem er mit einem Auge einen äußeren Gegenstand fixierte, mit dem anderen den Faden im Fernrohre betrachtete, stellte er die Okularlinse so, daß ihm der Faden ebenso deutlich wie das äußere Objekt erschien, und maß, um wie viel die Linse verschoben werden mußte, um den Faden in zwei verschiedenen Farben gleich deutlich zu sehen. Mit Berücksichtigung der schon vorher gemessenen chromatischen Abweichung der Okularlinse selbst konnte er dann berechnen, welches die entsprechenden Sehweiten des Auges seien. Er fand bei diesen Versuchen, daß ein Auge, welches ein unendlich entferntes Objekt deutlich sieht, dessen Licht der Linie C des Sonnenspektrums, also der Grenze zwischen Rot und Orange entspricht, bei demselben Akkommodationszustande ein Objekt, dessen Licht der Farbe der Linie G (Grenze von Indigblau und Violett) entspräche, auf 18 bis 24 Par. Zoll nähern müßte, um es deutlich zu sehen.

Ich habe an meinen eigenen Augen ähnliche Resultate erhalten. Ich ließ verschiedenfarbiges, mittels eines Prismas isoliertes Licht durch eine punktförmige Öffnung eines dunklen Schirms fallen, und suchte dann die größte Entfernung auf, aus der ich die kleine Öffnung noch punktförmig sehen konnte. Die größte Sehweite meines Auges für rotes Licht beträgt gegen 8 Fuß, für violettes $1^1/_2$ Fuß und für das brechbarste überviolette Licht der Sonne, welches durch Abblendung des helleren Lichts des Spektrums sichtbar gemacht werden kann, nur einige Zolle.

Auffallend bemerkt man die Verschiedenheiten der Sehweiten, wenn man ein regelmäßig rechteckiges, auf einen weißen Schirm projiziertes prismatisches Spektrum aus einiger Entfernung betrachtet. Während man das rote Ende noch ziemlich gut in seiner wirklichen Form erkennt, erscheint das violette als eine Zerstreuungsfigur (die für meine Augen schwalbenschwanzförmig ist).

Das im Vergleiche mit künstlichen optischen Instrumenten ziemlich geringe Zerstreuungsvermögen des menschlichen Auges erklärt sich daraus, daß die Dispersion des Wassers und der meisten wässrigen Lösungen überhaupt viel geringer ist als die des Glases. Da die Brechungsverhältnisse der optischen Medien des Auges meist nicht beträchtlich von dem des Wassers abweichen, so scheint es wahrscheinlich zu sein, daß wenigstens die wässrige Feuchtigkeit und der Glaskörper auch nahezu dasselbe Zerstreuungsvermögen wie das Wasser haben werden. Ich habe deshalb die Dispersion für Listings reduziertes Auge mit einer brechenden Fläche berechnet unter der Annahme, daß Wasser darin als brechende Substanz gebraucht sei. Für die von Fraunhofer bei seinen Versuchen gebrauchten Strahlen sind die Brechungsverhältnisse des Wassers folgende:

für das rote Licht der Linie C	1,331705
für das violette der Linie G	1,341285.

Der Radius der einen brechenden Fläche von LISTINGS reduziertem Auge ist 5,1248 mm. Daraus ergeben sich die Brennweiten im Innern des Auges:

im Rot	20,574 mm.
im Violett	20,140 mm.

Ist das Auge im Rot für unendliche Ferne akkommodiert, steht also die Netzhaut im Brennpunkte der roten Strahlen, so liegt der Brennpunkt der violetten 0,434 mm vor ihr, woraus folgt, daß in violettem Lichte dieses Auge für eine Entfernung von 713 mm (26 Zoll) akkommodiert sein würde. FRAUNHOFER fand für sein eigenes Auge 18 bis 24 Zoll, woraus folgt, daß die Farbenzerstreuung in einem aus destilliertem Wasser gebildeten Auge selbst noch etwas geringer sein würde, als sie im menschlichen Auge sich findet. Nimmt man dagegen an, daß das reduzierte Auge wie meines im Rot für 8 Fuß (2,6 m) akkommodiert sei, so würde die Netzhaut noch 0,123 mm hinter dem Brennpunkte der roten Strahlen liegen müssen, und im Violett das Auge für $20^3/_4$ Zoll (560 mm) akkommodiert sein, während meines in der Tat für 18 Zoll akkommodiert war. Auch MATTHIESSEN[1] berechnet aus seinen Versuchen den Abstand des roten und violetten Brennpunktes im menschlichen Auge auf 0,58 bis 0,62 mm, während er in einem Auge aus destilliertem Wasser nur gleich 0,434 mm ist. MATTHIESSEN hat seine Messungen in der Weise angestellt, daß er den kürzesten Abstand maß, in welchem eine Glasteilung von rotem oder violettem Lichte beleuchtet deutlich gesehen werden konnte. Alle diese nach verschiedenen Methoden ausgeführten Untersuchungen stimmen darin überein, daß das menschliche Auge in bezug auf Farbenzerstreuung mit einem Auge aus destilliertem Wasser sehr nahe übereinstimmt, wahrscheinlich aber eine etwas stärkere Dispersion hat. Wir dürfen daraus wohl vermuten, daß die Kristallinse ein im Verhältnis zu ihrem Brechungsvermögen etwas stärkeres Zerstreuungsvermögen als reines Wasser hat.

Ich will hier noch die Beschreibung einiger Versuche anreihen, bei denen sich die Farbenzerstreuung im Auge merklich macht. Im allgemeinen sind die hierher gehörigen Erscheinungen viel auffallender, wenn man dabei nicht weißes Licht, sondern Licht braucht, welches aus nur zwei prismatischen Farben von möglichst verschiedener Brechbarkeit zusammengesetzt ist. Am leichtesten erhält man solches Licht, wenn man Sonnenlicht durch die gewöhnlichen violettgefärbten Gläser gehen läßt. Diese Gläser absorbieren die mittleren Strahlen des Spektrums ziemlich vollständig, und lassen nur die äußersten Farben Rot und Violett hindurch. Will man mit Lampenlicht experimentieren, welches wenig blaue und violette Strahlen enthält, so wendet man besser die gewöhnlichen blauen (durch Kobalt gefärbten) Gläser an, welche ebenfalls vom Orange, Gelb und Grün nur wenig, reichlich dagegen das äußerste Rot, das Indigblau und Violett hindurchlassen.

Man mache eine enge Öffnung in einen dunklen Schirm, befestige hinter derselben ein gefärbtes Glas von der erwähnten Art, und stelle ein Licht dahinter, dessen Strahlen durch das Glas und die Öffnung in das Auge des Beobachters fallen. Die Öffnung im Schirme können wir unter diesen Umständen als einen leuchtenden Punkt, der rote und violette Strahlen aussendet, betrachten. Dem Beobachter erscheint dieser Punkt in verschiedener Weise, je

[1] *Comptes rendus.* T. XXIV. p. 875.

nach der Entfernung, für welche sein Auge akkommodiert ist. Ist es für die roten Strahlen akkommodiert, so geben die violetten einen Zerstreuungskreis, und es erscheint ein roter Punkt mit violettem Lichthofe. Oder das Auge ist für die violetten Strahlen akkommodiert, dann geben die roten einen Zerstreuugskreis, und es erscheint ein violetter Punkt mit rotem Hofe. Auch ist ein Refraktionszustand des Auges möglich, wobei der Vereinigungspunkt der violetten Strahlen vor, der der roten hinter der Netzhaut liegt, und beide gleichgroße Zerstreuungskreise geben. Nur in diesem Falle erscheint der Lichtpunkt einfarbig. Bei diesem Refraktionszustande des Auges würden diejenigen einfachen Strahlen auf der Netzhaut vereinigt werden, deren Brechbarkeit die Mitte zwischen der der roten und violetten hält, also die grünen.

Deshalb geben diese Gläser ein Mittel von ziemlich großer Empfindlichkeit ab, um die Entfernungen zu bestimmen, innerhalb welcher das Auge sich für die mittleren Strahlen des Spektrums akkommodieren kann. Das sind nämlich die Entfernungen, innerhalb welcher das Auge das gemischte rot-violette Licht einfarbig sehen kann. Die Farbendifferenz der Ränder wird sehr leicht bemerkt, auch von einem Ungeübten, viel leichter als die Ungenauigkeit eines weißen Bildes. Ist das Auge für Licht jeder Brechbarkeit auf größere Entfernungen als die des leuchtenden Punktes akkommodiert, so geben die roten Strahlen einen größeren Zerstreuungskreis als die violetten, es erscheint also eine violette Scheibe mit rotem Saum. Ist das Auge für beide Farben auf kleinere Entfernungen als die des leuchtenden Punktes eingestellt, so erscheint umgekehrt ein roter Zerstreuungskreis mit blauem Saume.

Ähnliche Erscheinungen wie die der rot-violetten Gläser treten überall ein, wo ein Gegenstand zweierlei Arten verschiedenfarbigen Lichts von sehr unterschiedener Brechbarkeit aussendet. Sehr auffallend zeigen sie sich zum Beispiel auch bei den Versuchen über Mischung von Spektralfarben, welche ich später bei der Lehre von der Farbenmischung beschreiben werde.

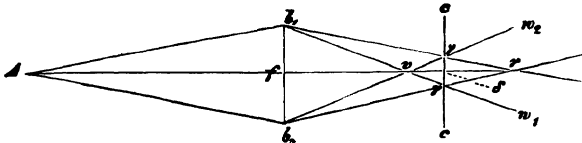
Bei weißer Beleuchtung tritt natürlich ebenfalls eine Zerlegung des zusammengesetzten einfachen Lichts ein, aber sie ist unter gewöhnlichen Umständen wenig merklich. Die Beobachtung lehrt in dieser Beziehung, daß weiße Flächen, welche weiter entfernt als der Akkommodationspunkt des Auges liegen, mit einem schwachen blauen Rande umgeben erscheinen, weiße Flächen, welche näher als der Akkommodationspunkt liegen, mit einem schwachen rotgelben Rande, weiße Flächen dagegen, für welche das Auge genau akkommodiert ist, lassen keine farbigen Ränder sehen, solange die Pupille vollständig frei ist, zeigen aber solche Ränder, sobald man dicht vor das Auge den Rand eines undurchsichtigen Blattes schiebt, und dadurch der einen Hälfte der Pupille das Licht abschneidet. Und zwar erscheint die Grenze zwischen einem weißen und schwarzen Felde gelb gesäumt, wenn man das Blatt von der Seite her vor die Pupille schiebt, wo das schwarze Feld liegt, blau gesäumt dagegen, wenn man es von der Seite des weißen Feldes her vorschiebt.

Die eben beschriebenen Farbenzerstreuungserscheinungen im menschlichen Auge erklären sich sehr leicht aus dem Umstande, daß der hintere Brennpunkt der violetten Strahlen vor dem der roten liegt.

Es sei Fig. 68 A der leuchtende Punkt, $b_1 b_2$ die vordere Hauptebene des Auges, v der Vereinigungspunkt der violetten, r der der roten Strahlen, cc die Ebene, in welcher sich die äußersten roten Strahlen des gebrochenen Strahlenkegels $b_1 b_2 r$ und die äußersten violetten $b_1 b_2 v$ schneiden. Der Anblick der

Figur ergibt sogleich, daß, wenn die Netzhaut vor der Ebene *cc* sich befindet, d. h. wenn das Auge für fernere Gegenstände als *A* akkommodiert ist, sie am Rande des Strahlenkegels nur von rotem Lichte, in der Achse aber von gemischtem getroffen werde. Steht sie in der Ebene *cc*, ist das Auge also für das Licht mittlerer Brechbarkeit von *A* akkommodiert, so wird sie überall von gleichmäßig gemischtem Lichte getroffen. Endlich, wenn die Netzhaut sich hinter der Ebene *cc* befindet, das Auge also für nähere Gegenstände als *A* akkommodiert ist, so trifft sie am Rande des Strahlenbündels nur violettes, in der Mitte gemischtes Licht.

Ist das Auge für *A* akkommodiert, befindet sich die Netzhaut also in der Ebene *cc*, und wird der untere Teil der Apertur $b_1 b_2$, durch welche der Strahlenkegel einfällt, bis *f* hin verdeckt, so fallen die violetten Strahlen zwischen $b_2 v$ und fv, sowie deren Verlängerungen zwischen $v w_2$ und vr fort, und die roten zwischen $b_2 r$ und fr. Es verschwindet dann also in der Ebene *cc* oberhalb der Achse das violette, unterhalb der Achse das rote Licht, und es wird sich auf der Retina statt des Bildes des Punktes *A* ein kleiner oben roter, unten violetter Zerstreuungskreis bilden.


Fig. 68.

Befindet sich in *A* statt eines einzelnen leuchtenden Punktes eine gleichmäßig rotes und violettes Licht aussendende Fläche, deren Bild auf der Retina entworfen wird, so wird gleichzeitig ein rotes und ein violettes Bild der Fläche entworfen werden, von denen mindestens eines ein Zerstreuungsbild sein muß. Zerstreuungsbilder von Flächen haben, wie in § 11 auseinandergesetzt ist, in ihrer Mitte, wo die Zerstreuungskreise der Punkte des Randes nicht hinreichen, dieselbe Helligkeit wie ein scharfgesehenes Bild. Ihre Ränder sind dagegen verwaschen und fließen so weit über das Bild der Umgebung über, als die Zerstreuungskreise der Randpunkte reichen. Wenn sich nun ein rotes und ein violettes Bild einer Fläche decken, so wird sich in der Mitte, soweit beide die normale Helligkeit haben, die Mischfarbe zeigen, an den Rändern aber diejenige Farbe allein erscheinen, deren Zerstreuungskreise die größten sind, für welche also der Rand des Bildes am weitesten über die Umgebung greift.

Wird das Bild der Fläche in der Ebene *cc* aufgefangen, wo die roten und violetten Zerstreuungskreise gleich groß sind, so werden die Farben bis zum Rande gleichmäßig gemischt sein. Zerstreuungsbilder verschieben sich aber scheinbar, wie wir aus § 11 wissen, wenn man einen Schirm vor die Pupille schiebt, und zwar nach entgegengesetzten Richtungen, wenn sie, wie in unserem Falle das rote und violette, das eine durch zu nahe, das andere durch zu weite Akkommodation entstehen. Daher hört die Kongruenz der farbigen Bilder auf, und es werden farbige Ränder sichtbar.

Für das rote Licht verhält sich die Fläche wie ein Gegenstand, der dem Auge zu nahe ist; ein solcher bewegt sich dem die Pupille verdeckenden Schirme scheinbar entgegen. Für das violette Licht verhält es sich umgekehrt. Verdeckt man also z. B. von unten her die Pupille, so verschiebt sich die rote Fläche scheinbar nach unten, die violette nach oben; unten wird ein roter, oben ein violetter Rand sichtbar. Betrachtet man eine schmale rot-violette

Linie durch einen schmalen Spalt, den man vor der Pupille hin und her bewegt, so gelingt es auch leicht, das rote von dem violetten Bilde ganz getrennt sichtbar zu machen.

Wenn von dem leuchtenden Punkte A, Fig. 68, nicht bloß rotes und violettes Licht, sondern aus allen Farben zusammengesetztes weißes Licht ausgeht, so schaltet sich das der übrigen Farben zwischen dem Rot und Violett ein, und die Wirkungen der Farbenzerstreuung sind weniger auffallend, als wenn zwei Farben allein da sind. Wo wir in diesem Falle einen violetten Saum um ein purpurnes Feld hatten, erscheint jetzt das weiße Feld gesäumt mit weißlichem Blau, Indigblau, Violett, und da die weißlichen Töne des inneren Randes dieses Saumes sich nicht merklich vom Weiß der Mitte unterscheiden, erscheint der farbige Saum überhaupt schmäler. Wo bei dem Versuche mit den zwei Farben ein rother Saum um das purpurne Feld erschien, haben wir jetzt um das weiße Feld herum zuerst weißliches Gelb, Orange, Rot, und wieder unterscheidet sich das weißliche Gelb fast gar nicht von dem Weiß des Grundes.

Eine besondere Betrachtung verdient die Dispersion des weißen Lichts noch für den Fall, wo die Netzhaut sich in der Ebene cc befindet, wo das Strahlenbündel seinen kleinsten Durchmesser hat. Rot und Violett bilden hier gleichgroße Zerstreuungskreise. Das mittlere Grün ist ganz in der Achse konzentriert, die übrigen Farben bilden kleinere Zerstreuungskreise. Der Zerstreuungskreis auf der Retina würde also am Rande gemischt aus Rot und Violett, d. h. purpurrot, in der Mitte grünlich erscheinen müssen. Indessen ist davon im Auge nichts zu sehen. Es sind nämlich gerade die lichtstärksten Farben Gelb und Grün bei dieser Stellung der Retina fast genau in einen Punkt vereinigt, und der purpurne Rand ist zu schmal und verhältnismäßig zu lichtschwach, um wahrgenommen zu werden.

Übrigens kann man alle die beschriebenen Erscheinungen ganz ebenso wie bei dem Auge, nur noch augenfälliger, an einem nicht achromatisierten Fernrohr wahrnehmen, wenn man eine stärkere Vergrößerung mit demselben erzeugt, als mit der Deutlichkeit des Bildes verträglich ist. In einem solchen Fernrohre wird das von der Objektivlinse entworfene Bild nicht auf einem Schirme aufgefangen, wie im Auge auf der Netzhaut, sondern durch die vergrößernden Okularlinsen vom Beschauer betrachtet. Eine Vergrößerung des vom Objektivglase entworfenen Bildes muß man aber anwenden, weil sonst die Farbensäume meist zu schmal sind, um deutlich gesehen zu werden. Auch hier sieht man, wenn das Fernrohr für einen entfernteren Gesichtspunkt eingerichtet ist, weiße Flächen rot und gelb gesäumt, ist es für einen näheren eingestellt, dagegen blau gesäumt. Bei der Einstellung, welche die schärfsten Bilder gibt, erscheinen dagegen sehr schmale purpurne Ränder. Verdeckt man eine Hälfte des Objektivs, so erscheinen an gegenüberliegenden Rändern der weißen Flächen blaue und gelbe Ränder usw., ganz wie unter analogen Verhältnissen im Auge.

Um die Größe der durch Dispersion im Auge erzeugten Zerstreungskreise zu berechnen, können wir Listings reduziertes Auge und darin Wasser als brechende Flüssigkeit zu Grunde legen, da nach Fraunhofers Messungen die farbenzerstreuende Kraft eines solchen Auges von der des menschlichen wenig abweichen würde. Es verhält sich (Fig. 68)

$$\frac{\gamma\gamma'}{b_1 b_2} = \frac{\delta r}{fr} = \frac{\delta v}{fv}, \text{ also ist}$$

$$\gamma\gamma \cdot fr = b_1 b_2 \cdot \delta r$$

$$\gamma\gamma \cdot fv = b_1 b_2 \cdot \delta v.$$ Beides addiert gibt

$$\gamma\gamma [fr + fv] = b_1 b_2 \cdot [\delta r + \delta v]$$

$$= b_1 b_2 [fr - fv]$$

$$\gamma\gamma = b_1 b_2 \frac{fr - fv}{fr + fv}.$$

Setzen wir $b_1 b_2$, entsprechend dem mittleren Durchmesser der Pupille normaler Augen, gleich 4 mm, und setzen, wie oben gefunden ist,

$$fr = 20{,}574 \text{ mm}$$

$$fv = 20{,}140 \text{ mm},$$

so wird $\gamma\gamma = 0{,}0426$ mm.

Nach der in § 11 gegebenen Tafel für die Größe der Zerstreuungskreise von Objekten, für welche das Auge nicht akkommodiert ist, würde daher der Durchmesser $\gamma\gamma$ der durch die Dispersion bedingten Zerstreuungskreise ebenso groß sein, wie der, den ein leuchtender Punkt in 1,5 m ($4^3/_4$ Fuß) Entfernung in einem für unendliche Entfernung akkommodierten Auge gibt. Eine solche Abweichung der Akkommodation gibt bei der Betrachtung feinerer Gegenstände schon eine recht merkliche Ungenauigkeit des Bildes, wie man bei Anstellung eines entsprechenden Versuches leicht erkennt. Um zu erklären, warum die Dispersion des weißen Lichts im Auge trotz der gleichen Größe der Zerstreuungskreise keine merkliche Ungenauigkeit des Bildes hervorbringt, muß man nicht bloß die Größe der Zerstreuungskreise, sondern auch die Verteilung des Lichts in denselben berücksichtigen.

Wenn ein Lichtkegel von einem einfarbig leuchtenden Punkte in das Auge fällt, und die Netzhaut sich vor oder hinter dem Vereinigungspunkte der Strahlen befindet, so wird ein Zerstreuungskreis gebildet, der in allen seinen Teilen gleiche Helligkeit hat.

Wenn dagegen das Auge von einem Kegel weißen Lichts getroffen wird und sich im Vereinigungspunkte der grüngelben Strahlen, welche die lichtstärksten sind, befindet, so werden diese auf einen Punkt der Netzhaut vereinigt, während die übrigen Strahlen Zerstreuungskreise bilden, welche um so größer werden, je mehr ihre Brechbarkeit von der der mittleren Strahlen abweicht.

Während also der Mittelpunkt des beleuchteten Kreises von Strahlen aller Art gleichzeitig getroffen wird, und namentlich auch von den lichtstärksten und am meisten konzentrierten Strahlen, fallen auf die dem Rande näher liegenden Teile des Kreises nur Strahlen von den äußersten Farben des Spektrums, welche erstens an und für sich schon lichtschwächer sind als die mittleren, und zweitens dadurch, daß sie ihr Licht über größere Zerstreuungskreise verteilen, noch mehr geschwächt sind. Die Rechnung ergibt, daß unter diesen Umständen die Helligkeit im Mittelpunkte des Zerstreuungskreises unendlich groß sein muß gegen alle anderen Punkte des Kreises.

Da wir für das Gesetz der Helligkeit der einzelnen Farben des Spektrums noch keinen mathematischen Ausdruck angeben können, wollen wir die Rechnung unter der Annahme durchführen, daß alle Farben des Spektrums gleiche Helligkeit haben. Dabei werden wir allerdings die Helligkeit der Ränder der Zerstreuungskreise größer finden, als sie in Wahrheit ist, aber es wird sich auch

unter dieser für unseren Zweck ungünstigen Annahme zeigen, warum die durch Farbenzerstreuung bedingten Zerstreuungskreise eine weit geringere Undeutlichkeit des Bildes geben, als die durch mangelnde Akkommodation bedingten von gleicher Größe.

Berechnung der Helligkeit in einem durch Dispersion erzeugten Zerstreuungskreise eines einzelnen leuchtenden Punktes.

Es sei in Fig. 69 bb die Hauptebene des reduzierten Auges vom Radius R; in ihr möge, wie das beim Auge nahehin der Fall ist, die Blendung liegen, welche das Strahlenbündel begrenzt, so daß bb ein Durchmesser der Blendung ist, deren Halbmesser wir in der Rechnung mit b bezeichnen wollen. Die Strahlen, welche in das Auge fallen, mögen parallel sein. Es sei ferner v der Brennpunkt für die äußersten violetten, w der für die äußersten roten Strahlen. Diese äußersten Strahlen schneiden sich in g, so daß gg der Durchmesser des ganzen Zerstreuungskreises und h sein Mittelpunkt ist. Die Netzhaut muß sich in der Ebene gg befinden, wenn sie das deutlichste Bild aufnehmen soll. Das Brechungsverhältnis der mittleren Strahlen, die sich in h vereinigen, nennen wir N, ihre Brennweite ah sei F. Dann ist nach § 9 Gleichung 3a)

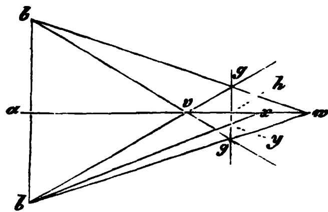


Fig. 69.

$$F = \frac{NR}{N-1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1\text{a}).$$

Das Brechungsverhältnis irgend einer anderen Art von Strahlen, welche ihren Brennpunkt in x haben, sei n, die zugehörige Brennweite ax gleich f. Dann ist

$$f = \frac{nR}{n-1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1\text{b}).$$

Den Radius des Zerstreuungskreises, den diese Strahlen geben, hy nennen wir ϱ. Er ist gegeben durch die Gleichung

$$\frac{\varrho}{b} = \frac{f-F}{f},$$

wenn $f > F$, also $n < N$, oder durch

$$\frac{\varrho}{b} = \frac{F-f}{f},$$

wenn $f < F$, also $n > N$. Setzen wir hierin die Werte von F und f aus 1a) und 1b), so erhalten wir

$$\frac{\varrho}{b} = \frac{N-n}{n(N-1)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2\text{a}),$$

wenn $n < N$, und

$$\frac{\varrho}{b} = \frac{n-N}{n(N-1)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2\text{b}),$$

wenn $n < N$.

Die Helligkeit H nun, mit welcher die Farbe von dem Brechungsverhältnis n die Netzhaut beleuchtet, ist

$$H = A \frac{b^2}{\varrho^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3),$$

wenn wir die Helligkeit mit A bezeichnen, mit welcher das betreffende Licht die Fläche $b\,b$ beleuchtet. Setzen wir in 3) statt $\frac{b}{\varrho}$ seinen Wert aus 2a) oder 2b), so erhalten wir übereinstimmend:

$$H = A \frac{n^2 (N-1)^2}{(n-N)^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3a).$$

Die Helligkeit J irgend eines Punktes im Zerstreuungskreise wird nun werden

$$J = \int H\,d\,n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4),$$

wobei wir das Integral über alle diejenigen Werte von n auszudehnen haben, deren zugehörige Farben auf jenen Punkt fallen.

In dem Ausdrucke für H ist der Faktor A in Wirklichkeit eine Funktion von n, deren mathematischen Ausdruck wir aber nicht kennen. Der Faktor n^2 verändert in der ganzen Ausdehnung des Spektrums seinen Wert sehr wenig. Wir wollen deshalb setzen

$$A\,n^2 (N-1)^2 = B$$

und B als konstant ansehen, d. h. annehmen, daß die Helligkeit der Spektralfarben durch die ganze Ausdehnung des Spektrums nahehin konstant sei, und nur wenig vom roten zum violetten Ende hin abnehme. Diese Annahme ist für unseren Zweck jedenfalls ungünstiger als die Wirklichkeit. Dann wird nach 4)

$$J = \int \frac{B\,d\,n}{(N-n)^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 4a)$$

zwischen den gehörigen Grenzen genommen. Es fallen aber auf jeden Punkt des Zerstreuungskreises erstens Strahlen von dem roten und zweitens Strahlen von dem violetten Ende des Spektrums. Die Grenzen der Brechbarkeit für die ersteren seien n_1 und n_2, so daß

$$N > n_2 > n_1\,,$$

die Grenzen für die letzteren seien n_3 und n_4, so daß

$$n_4 > n_3 > N.$$

Dann wird die Gleichung 4a)

$$\left.\begin{aligned} J &= B \int_{n_1}^{n_2} \frac{d\,n}{(N-n)^2} + B \int_{n_3}^{n_4} \frac{d\,n}{(N-n)^2} \\ &= B \left\{ \frac{1}{N-n_2} - \frac{1}{N-n_1} + \frac{1}{N-n_4} - \frac{1}{N-n_3} \right\} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 4b).$$

Ist nun ϱ_0 die Entfernung des Punktes, dessen Helligkeit wir bestimmen wollen, vom Mittelpunkte des Zerstreuungskreises, so wird dieser Punkt von allen denjenigen Farben getroffen, für welche die Radien der Zerstreuungskreise größer

sind als ϱ_0, also zwischen ϱ_0 und r liegen. Nun ist für die weniger brechbaren Farben, wenn wir aus Gleichung 2a) den Wert von $N-n$ bestimmen,

$$\frac{1}{N-n}=\frac{1}{N}+\frac{1}{N(N-1)}\cdot\frac{b}{\varrho}.$$

Für n_1 ist $\varrho = r$, für n_2 ist $\varrho=\varrho_0$, also

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{N-n_1}&=\frac{1}{N}+\frac{1}{(N-1)N}\cdot\frac{b}{r}\\ \frac{1}{N-n_2}&=\frac{1}{N}+\frac{1}{(N-1)N}\cdot\frac{b}{\varrho_0}\end{aligned}\right\}\quad\ldots\ldots\ldots\quad 4c).$$

Für die Bestimmung von n_3 und n_4 müssen wir den Wert von $N-n$ aus Gleichung 2b) entnehmen.

$$\frac{1}{N-n}=\frac{1}{N}-\frac{1}{N(N-1)}\frac{b}{\varrho}.$$

Für $n=n_4$ wird $\varrho=r$, und für $n=n_3$ wird $\varrho=\varrho_0$, also

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{N-n_4}&=\frac{1}{N}-\frac{1}{N(N-1)}\frac{b}{r}\\ \frac{1}{N-n_3}&=\frac{1}{N}-\frac{1}{N(N-1)}\cdot\frac{b}{\varrho_0}\end{aligned}\right\}\quad\ldots\ldots\ldots\quad 4d).$$

Setzen wir die Werte aus 4c) und 4d) in 4b), so erhalten wir endlich

$$J=\frac{2B}{N(N-1)}\left\{\frac{b}{\varrho^0}-\frac{b}{r}\right\}\quad\ldots\ldots\ldots\ldots\quad 5).$$

Dieser Wert von J wird in der Mitte des Zerstreuungskreises für $\varrho_0=0$ unendlich groß, am Rande, wo $\varrho_0=r$, gleich 0.

Berechnung der Helligkeit am Rande einer gleichmäßig erleuchteten Fläche. Es sei in Fig. 70 AB die Grenzlinie der leuchtenden Fläche, und angenommen, daß jeder Punkt derselben als Zerstreuungskreis erscheine. Es sei ferner p der Punkt, dessen Helligkeit bestimmt werden soll, und $pq=r$ der Radius der Zerstreuungskreise. Es wird auf p Licht gelangen aus allen denjenigen Punkten der Fläche, welche innerhalb des mit dem Radius r um p geschlagenen Kreises liegen. Wenn s einer dieser Punkte ist, und wir die Länge sp mit ϱ, den Winkel spq mit ω, und die Helligkeit des Zerstreuungskreises eines einzelnen Punktes in der Entfernung ϱ vom Zentrum mit J bezeichnen, so wird die Helligkeit H im Punkte p werden:

$$H=\int\!\!\int J\varrho\, d\omega\, d\varrho\quad\ldots\ldots\quad 6).$$

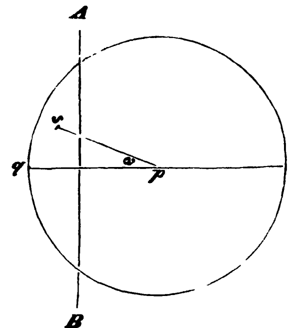


Fig. 70.

dieses Integral ausgedehnt über alle Teile der Fläche, welche innerhalb des um p geschlagenen Kreises liegen.

Wenn der Rand der Fläche eine gerade Linie und der Abstand des Punktes s von diesem Rande gleich x ist, so ist für die am Rande gelegenen Punkte der Fläche

$$\varrho\cos\omega = x,$$

und wenn wir den Ausdruck für H zuerst nach ω integrieren, und aus der letzten Gleichung den Wert für die Grenzen von ω entnehmen,

$$H = \int_x^r 2\,J\varrho \arccos\left(\frac{x}{\varrho}\right) d\varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6\mathrm{a}).$$

Wenn die Zerstreuungskreise durch unpassende Akkommodation entstehen, können wir J als unabhängig von ϱ betrachten und erhalten dann:

$$H = J\left[r^2 \arccos\left(\frac{x}{r}\right) - x\sqrt{r^2 - x^2}\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7),$$

welche Gleichung für diesen Fall die Helligkeit in der Nähe des Randes der Fläche als Funktion des Abstandes vom Rande gibt. Für $x = r$ wird $H = 0$, für $x = -r$ wird $H = Jr^2\pi$ und geht hier in die konstante Helligkeit der Fläche über.

Wenn die Zerstreuungskreise durch Dispersion entstanden sind, können wir in Gleichung 6a) den Wert von J aus Gleichung 5) setzen, und erhalten durch Ausführung der Integration:

$$H = \frac{2Bb}{N(N-1)}\left\{r \arccos\left(\frac{x}{r}\right) + \frac{x}{r}\sqrt{r^2 - x^2} + x \log\mathrm{nat}\left(\frac{r - \sqrt{r^2 - x^2}}{r + \sqrt{r^2 - x^2}}\right)\right\} \quad . \quad 8).$$

Für $x = r$ wird $H = 0$, für $x = -r$ wird

$$H = \frac{2Bbr\pi}{N(N-1)}$$

und geht hier in die konstante Helligkeit des mittleren Teils der Fläche über.

Um den Gang dieser Funktionen übersichtlicher darzustellen, habe ich in Fig. 71 die beiden Kurven konstruiert. A entspricht der Gleichung 7), B der Gleichung 8). In beiden sind die Werte von x in horizontaler, die Werte der Helligkeit H in vertikaler Richtung aufgetragen. Die Ordinate ab entspricht

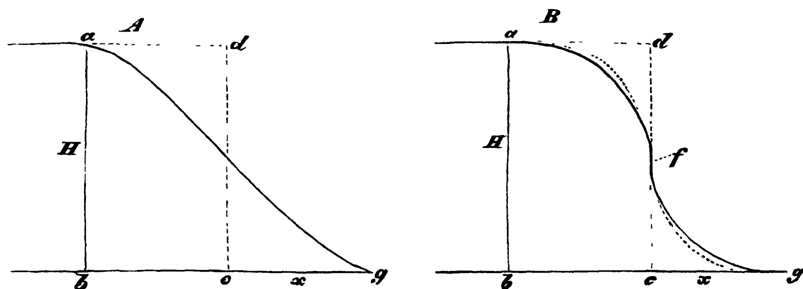


Fig. 71.

der Helligkeit in der Mitte der Fläche, c bezeichnet den Ort des Randes, so daß die Linie adc die Helligkeit eines ganz scharfen Bildes bezeichnen würde. Die Grenzen des Zerstreuungskreises von c sind b und g. Die Kurve B zeichnet sich dadurch vor der anderen aus, daß sie in ihrer Mitte bei f, entsprechend dem wirklichen Orte des Randes, ganz senkrecht abfällt. Es wird hier für $x = 0$ nämlich der Differentialquotient

$$\frac{dH}{db} = \frac{2Bb}{N(N-1)}\left\{\frac{2}{r}\sqrt{r^2 - x^2} + \log\text{nat}\left[\frac{r - \sqrt{r^2 - x^2}}{r + \sqrt{r^2 - x^2}}\right]\right\} \quad . \quad . \quad . \quad 9).$$

unendlich groß. Dieser plötzliche Abfall der Helligkeit am Rande der Fläche macht für das Auge die Lage des Randes erkennbar, wenn auch eine gewisse Menge Licht sich noch weiter verbreitet, während in der Kurve A die Abnahme der Helligkeit ziemlich gleichmäßig stattfindet, und der Ort des Randes durch kein besonderes Kennzeichen ausgezeichnet ist.

Wenn man die nach den Enden des Spektrums abnehmende Helligkeit der Farben in Rechnung ziehen könnte, so würde die Kurve B etwa die Form der punktierten Linie bekommen müssen. Die Helligkeit innerhalb der Grenzen der Fläche würde sich der normalen noch mehr nähern, und außerhalb dieser Grenzen würde sie noch geringer werden.

Aus diesen Verhältnissen erklärt es sich, warum die Farbenzerstreuung der Bilder im Auge der Schärfe des Sehens so wenig Eintrag tut. Ich habe mir Linsen zusammengestellt, welche imstande waren, das Auge achromatisch zu machen, aber nicht gefunden, daß die Schärfe des Gesichts dadurch merklich erhöht wurde. Ich fand zu dem Ende eine konkave Flintglaslinse von 15,4 mm Brennweite, von einem Objektivglase eines Mikroskops genommen, passend. Diese setzte ich zusammen mit konvexen Crownglaslinsen, so daß dadurch ein System von etwa $2^1/_2$ Fuß negativer Brennweite entstand, wie es für mein Auge paßte, um ferne Gegenstände gut zu erkennen. Wenn ich durch dieses System sah, und die halbe Pupille verdeckte, entstanden keine farbigen Ränder an der Grenze dunkler und heller Gegenstände mehr. Ebensowenig entstanden dergleichen bei unpassender Akkommodation des Auges, so daß das Auge durch dieses Linsensystem wirklich achromatisch gemacht war. Ich konnte aber nicht finden, daß die Schärfe des Sehens in irgend merkbarer Weise zugenommen hätte.

Newton kannte schon die Farbenzerstreuung im Auge; er erwähnt die Farbenränder, welche bei halbverdeckter Pupille erscheinen[1]. Es ist bekannt, das Newton, weil er irrtümlich voraussetzte, die Disperson aller durchsichtigen Mittel sei ihrer Brechkraft proportional, zu dem Schlusse kam, daß es keine achromatischen Linsensysteme geben könne. Wunderlicherweise fand Euler[2] in dieser Beziehung das Richtigere, indem er jedoch dabei von der anderen falschen tatsächlichen Voraussetzung ausging, daß das Auge achromatisch sei, und daraus folgerte, daß Newtons Annahme über die Dispersion falsch sein müsse. Ihm widersprach in dieser Beziehung d'Alembert[3], indem er nachwies, daß im Auge die Farbenzerstreuung nicht merklich zu werden brauche, selbst wenn sie ebenso groß wie in Gläsern sei. Ebenso widersprach Dollond[4], welcher behauptete, daß trotz der Anwendung verschiedener brechender Substanzen im Auge es nicht achromatisch sein könne, da alle einzelnen Brechungen der Lichtstrahlen nach der Achse zu gingen. Wenn wir die bisher stets durch die Erfahrung bestätigte Tatsache als allgemeingiltig ansehen, daß bei jeder Brechung des Lichts an der Grenzfläche von beliebigen zwei Substanzen die violetten Strahlen stärker gebrochen werden als die roten, so ist Dollonds Beweisführung gültig. Dann muß nämlich im Auge jedenfalls bei jeder Brechung das violette Licht sich der Achse

[1] *Optics.* Lib. I. P. II. Prop. VIII.
[2] *Journal Encyclop.* 1765. II. p. 146. — *Mém. de l'Acad. de Berlin.* 1747.
[3] *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1767. p. 81.
[4] *Philos. Trans.* LXXIX. p. 256.

mehr nähern als das rote. MASKELYNE[1] hat auch Messungen der Farbenzerstreuung gemacht und gefunden, daß das Intervall der Brennpunkte 0,02 Zoll (0,61 mm) betrage, was einem Gesichtswinkel von 15 Sek. entspreche, während man in Fernröhren sie noch bis zu einem Gesichtswinkel von 57 Sek. zulässig finde. JURIN[2] hat die farbigen Ränder unbestimmt gesehener Objekte bemerkt. WOLLASTON[3] machte auf das eigentümliche Aussehen des prismatischen Spektrums aufmerksam, welches von der Unfähigkeit des Auges, sich für alle Farben gleichzeitig zu akkommodieren, her rührt. Eine vollständige Theorie der Erscheinungen bei halbverdeckter Pupille gab MOLLWEIDE[4], eine vollständige Bearbeitung sämtlicher hierher gehörigen Erscheinungen TOURTUAL. Die ersten genauen Messungen der Farbenzerstreuung des Auges stellte FRAUNHOFER[5] an, mit Berücksichtigung der von WOLLASTON und ihm entdeckten festen Linien im Spektrum, spätere MATTHIESSEN[6].

Trotz aller dieser Untersuchungen hielten manche Naturforscher doch bis in die letzte Zeit die Idee von der absoluten Vollkommenheit des Auges und somit auch seiner mehr oder weniger vollkommenen Achromasie fest, wie FORBES[7], VALLÉE[8].

1704. J. NEWTON, *Optics.* B. I. P. II. Prop. VIII*.
1747. L. EULER, *Mém. de Berlin.* 1747. p. 285. — 1753. p. 249. — 1754. p. 200.
1767. D'ALEMBERT, *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1767. p. 81*.
1789. MASKELYNE, *Phil. Trans.* LXXIX. 256*.
1798. COMPARETTI, Observationes de coloribus apparentibus. Patavini.
1801. TH. YOUNG, *Phil. Trans.* 1801. P. I. p. 50*.
1805. MOLLWEIDE in GILBERTS Annalen. XVII. 328. u. XXX. 220.
1814. *FRAUNHOFER in GILBERTS Annalen. LVI. 304. — SCHUHMACHERS astronom. Abhandlungen. Altona 1823. Heft II. S. 39.
1826. J. MÜLLER, Zur vergl. Physiol. des Gesichtssinns. Leipzig. S. 195. 414*.
1830. *TOURTUAL, Über Chromasie des Auges. MECKELS Archiv. 1830. S. 129*.
1837. MILE, POGGENDORFFS Ann. XLII. 64.
1847. A. MATTHIESSEN, *Comptes rendus,* XXIV. 875; *Institut.* Nr. 698. p. 162; POGGENDORFFS Ann. LXXI. 578*; FRORIEPS Notizen. III. 341: *Archive d. sciences phys. et natur.* V. 221; Berl. Berichte. 1847. S. 183*.
L. L. VALLÉE, *Comptes rendus.* XXIV. 1096; Berl. Bér. 1847. S. 184*.
1849. J. D. FORBES, *Proceed. Edinburgh Roy. Soc.* Dezb. 3 1849. p. 251; SILLIMANS *Journ.* (2) XIII. 413; Berl. Ber. 1850. p. 492*.
1852. L. L. VALLÉE, *Comptes rendus.* XXXIV. 321; Berl. Ber. 1852. S. 308*.
1853. L. L. VALLÉE, *Sur l'achromatisme de l'oeil. C. R.* XXXVI. 142—144; 480—482.
1855. CZERMAK, Zur Chromasie des Auges. Wiener Sitzungsber. XVII. 563.
1856. A. FICK, Einige Versuche über die chromatische Abweichung des menschlichen Auges. Archiv für Ophthalm. II. 2. 70—76.
1862. F. P. LEROUX, *Expériences destinées à mettre en évidence le défaut d'achromatisme de l'oeil. Ann. de chimie.* 3. LXVI. 173—182. Cosmos. XX. 638—639.
— TROUESSART, *Défaut d'achromatisme de l'oeil. Presse scientifique.* p. 72—74.

Zusatz von A. Gullstrand.

Bei der Weiterentwicklung der Lehre von der optischen Abbildung und von den Aberrationen hat sich die Notwendigkeit herausgestellt, die früher unter dem Begriffe der chromatischen Aberration zusammengefaßten Er-

---

[1] *Philos. Trans.* LXXIX. 258.
[2] SMITHS *Optics.* 96.
[3] *Philos. Trans.* 1801. P. I. p 50.
[4] GILBERTS Annalen. XVII. 328. XXX. 220.
[5] GILBERTS Annalen. LVI. 304. — SCHUHMACHERS astronom. Abhandlungen. Heft II. S. 39.
[6] *Comptes rendus.* XXIV. 875.
[7] *Proc. Roy. Edinb. Soc.* Dezb. 3. 1849. p. 251.
[8] *Comptes rendus.* XXIV. 1096. XXXIV. 321.

scheinungen behufs genauerer Untersuchung zu sondern. Da sämtliche die optische Abbildung bestimmenden Größen für verschiedene Brechungsindices verschiedene Werte erhalten können, so kann die Erscheinung der sogenannten chromatischen Aberration nur durch die chromatischen Differenzen dieser Größen exakt dargestellt werden. Längs der Achse eines zentrierten optischen Systems hat man dabei in erster Annäherung mit der chromatischen Fokusdifferenz und mit der chromatischen Vergrößerungsdifferenz zu rechnen. Jene gibt den Abstand der Fokalpunkte voneinander an, wenn zwei verschiedene Lichtarten zur Verwendung kommen, diese ist bei unendlichem Objektabstande dem Unterschiede der vorderen Brennweiten proportional. Nur in dem speziellen Fall, wo der Ort des hinteren Knotenpunktes vom Brechungsindex unbeeinflußt bleibt, wie im reduzierten Auge, kann die Vergrößerungsdifferenz direkt aus der Fokusdifferenz erhalten werden, was somit für das menschliche Auge nicht zutrifft. Aus demselben Grunde verschwinden bei der Achromatisierung unendlich dünner optischer Systeme beide Differenzen gleichzeitig, was sonst allgemein nicht der Fall ist.

Die Fokusdifferenz ist oben von Helmholtz unter Beachtung der Lichtverteilung innerhalb der Zerstreuungskreise gewürdigt worden. Was die Vergrößerungsdifferenz betrifft, so dürfte sie durch eben denselben Mechanismus wie die Fokusdifferenz unschädlich gemacht werden, solange es sich um sehr kleine Bilder handelt. Daß ein heller Punkt ohne farbige Säume gesehen wird, beruht, wie Helmholtz bewiesen hat, darauf, daß auf gleich große Zerstreuungskreise des langwelligsten und des kurzwelligsten Lichtes eingestellt wird, und auf der geringen Helligkeit der farbigen Ränder. Zwei helle Punkte nebeneinander können aber nicht gleichzeitig konzentrische Zerstreuungskreise für kurzwelliges und langwelliges Licht geben, da einer notwendigerweise außerhalb der Achse liegen muß. Wegen der chromatischen Vergrößerungsdifferenz ist für diesen Punkt das Zentrum der durch kurzwelliges Licht erzeugten Zerstreuungskreise der Achse näher gelegen als das Zentrum der durch langwelliges Licht verursachten, woraus wieder folgt, daß die beiden Seiten des Punktes nicht gleichzeitig in einer und derselben Farbe gesehen werden können. Da sich die chromatische Differenz der Bildgröße zur Bildgröße bei einer gewissen Lichtart, wie die vordere Brennweitendifferenz zur entsprechenden vorderen Brennweite verhält, so kann dieses Verhältnis aus den Helmholtzschen Zahlen für das reduzierte Auge entnommen werden. Es ist rund 3 %. Wenn es nun auch im menschlichen Auge etwas größer sein mag, so ist es doch einleuchtend, daß eine ziemliche Bildgröße dazu nötig ist, damit die Differenz wahrnehmbar sei, und man kann sich anbetrachts der Lichtverteilung in den chromatischen Zerstreuungskreisen nicht vorstellen, daß die Differenz wahrgenommen werden könnte, wenn die Bildgröße, wie die Winkelausdehnung der Stelle des schärfsten Sehens, in Minuten gerechnet wird.

Bei zunehmender Bildgröße wächst auch der chromatische Unterschied derselben, nimmt aber gleichzeitig die Fähigkeit, die farbigen Säume zu sehen, ab, indem dieselben immer weiter von der Stelle schärfsten Sehens entfernt auf die Netzhaut fallen. Wenn nun diese Abnahme des Distinktionsvermögens proportional zur Breitenzunahme der farbigen Säume wäre, so würden die Erscheinungen der chromatischen Vergrößerungsdifferenz, obwohl physikalisch auf der Netzhaut vorhanden, physiologisch nicht durch sichtbare farbige Säume konstatiert werden können. Für große Abstände der Bildpunkte vom Zentrum

der Fovea wird auch dieser physiologische Mechanismus hinreichend sein, um die chromatische Vergrößerungsdifferenz zu verdecken. Wenn aber zwei helle schmale Linien, deren Winkelabstand 3° beträgt, das Objekt ausmachen, und ein zwischen beiden symmetrisch belegener Punkt fixiert wird, so ist der scheinbare Winkelabstand der beiden Linien voneinander im violetten Lichte um mehr als 5 Minuten kleiner als im roten, welcher Unterschied sich mit der Hälfte auf jede Linie verteilt, so daß an Stelle der hellen Linie ein unreines Spektrum von ungefähr 2,5 Minuten scheinbarer Breite entsteht. Ohne nun behaupten zu wollen, daß das Auge die Fähigkeit besitze, in einem 1,5° betragenden Winkelabstand vom fixierten Punkte ein solches Spektrum von einer hellen Linie zu unterscheiden, worüber exakte Untersuchungen nicht vorliegen und wohl auch schwer anzustellen sein dürften, will ich hier nur darauf aufmerksam machen, daß im Auge ein Mechanismus vorhanden ist, welcher bei solcher Objektgröße der chromatischen Vergrößerungsdifferenz entgegenwirkt.

Wie ich durch entoptische Untersuchungen bewiesen habe,* findet beim Übergang des Lichtes aus dem Glaskörper in die Netzhaut eine bedeutende chromatische Dispersion desselben statt. Dies geht daraus hervor, daß der durch die Lichtbrechung in dem am stärksten gekrümmten zentralen Teile der Fovea entstehende Schatten — die von mir sogenannte entoptische Fovea — nur im kurzwelligen, nicht aber im langwelligen Lichte gesehen werden kann, und beruht ohne Zweifel auf dem Luteingehalt der Gewebslymphe der Netzhaut. Beim Übergang des Lichts in die Netzhaut werden die paraxialen Bildpunkten angehörigen Strahlen in der Fovea in der Richtung von der Achse weggebrochen. und da diese Brechung entweder nur die kurzwelligen Lichtstrahlen oder aber diese in höherem Grade als die langwelligen beeinflußt, so resultiert eine relative Vergrößerung der durch jene Strahlen entstehenden Bilder. In welchem Maße dieses Moment zur Neutralisierung des Effektes der chromatischen Vergrößerungsdifferenz notwendig und hinreichend ist, läßt sich allerdings vor der Hand nicht beurteilen.

Da die Visierlinie keine Zentrierungsachse des Auges darstellt, so liegt, wenn Licht verschiedener Wellenlänge ins Auge fällt, das Zentrum der Austrittspupille in verschiedenen Punkten, und es müßte eigentlich mit einer chromatischen Neigungsdifferenz der Visierlinie im Glaskörper gerechnet werden. Diese wird aber von der durch die monochromatischen Aberrationen bedingten asymmetrischen Form der Zerstreuungskreise verdeckt, welche sich beim Versuche mit dem Kobaltglas dadurch kundgibt, daß bei der Einstellung für rotes Licht der um eine kleine künstliche Lichtquelle sichtbare bläuliche Zerstreuungskreis den meisten Augen temporal breiter erscheint als nasal.

§ 14. Monochromatische Abweichungen.**

Außer der Ungenauigkeit des Bildchens, welche durch die ungleiche Brechung verschiedenfarbiger Lichtstrahlen bedingt ist, kommt bei den optischen Instrumenten, welche Glaslinsen mit sphärischen Flächen enthalten, noch eine zweite Art der Abweichung vor, die Abweichung wegen der Kugelgestalt

* Die Farbe der Macula centralis retinae. Arch. f. Ophth. LXII, 1. S. 1. 1905. Zur Maculafrage. Ebenda LXVI, 1. S. 141. 1907.

** Vgl. Kap. 5 der nach dem ersten Abschnitte folgenden Zusätze! G.

oder sphärische Aberration, welche darin besteht, daß auch Lichtstrahlen von gleicher Farbe, die von einem Punkte ausgehen, von krummen Flächen im allgemeinen nicht genau, sondern nur annähernd in einen Punkt wieder vereinigt werden. Es gibt allerdings gewisse krumme Flächen, welche die Lichtstrahlen, die von einem bestimmten leuchtenden Punkte ausgehen, ganz genau in einen Punkt wieder vereinigen (aplanatische Flächen). Es sind dies Rotationsflächen, deren Erzeugungskurve im allgemeinen durch eine Gleichung vierten Grades gegeben wird. In gewissen Fällen aber, z. B. wenn der leuchtende Punkt in unendlicher Entfernung liegt, ist die Erzeugungskurve eine Ellipse. Auch kann in Systemen von kugeligen brechenden Flächen durch eine passende Kombination der Krümmungsradien und Abstände der Flächen die Kugelabweichung auf ein Minimum gebracht werden. Auch solche Systeme nennt man aplanatisch. Übrigens ist natürlich der Zerstreuungskreis, den das Bild eines in der optischen Achse eines solchen Systems liegenden leuchtenden Punktes bildet, rings um die Achse symmetrisch. Er bildet einen hellen Fleck, dessen Helligkeit in der Achse am stärksten ist, und von da nach allen Seiten hin schnell abnimmt.

Die im Auge vorkommenden monochromatischen Abweichungen sind nicht, wie die sphärische Aberration der Glaslinsen, symmetrisch um eine Achse, sie sind vielmehr unsymmetrisch und von einer Art, wie sie bei gut gearbeiteten optischen Instrumenten nicht vorkommen darf. Diese Art der Abweichung, für welche in bezug auf Kugelflächen der Name sphärische Aberration, in bezug auf andere krumme Flächen der Name Abweichung wegen der Gestalt der brechenden Fläche gebraucht wird, wollen wir, da auch die letztere Bezeichnung für das Auge nicht allgemein genug ist, monochromatische Abweichung nennen, da sie einfaches (monochromatisches) Licht ebensogut betrifft, wie das zusammengesetzte weiße, und sich dadurch von der im vorigen Paragraphen behandelten chromatischen Abweichung unterscheidet.

Die Erscheinungen sind folgende: 1. Man wähle zuerst als Objekt einen sehr kleinen leuchtenden Punkt (ein mit einer Nadel gestochenes Löchelchen in schwarzem, undurchsichtigem Papier, durch welches Licht fällt) und bringe ihn in eine etwas größere Entfernung, als die größte Akkommodationsdistanz beträgt, so daß auf der Netzhaut ein kleiner Zerstreuungskreis entsteht. Man sieht alsdann statt des hellen Punktes nicht, wie es in einem schlecht eingestellten Fernrohre der Fall ist, eine kreisförmige Fläche, sondern eine strahlige Figur von vier bis acht unregelmäßigen Strahlen, welche in beiden Augen verschieden zu sein pflegt und auch für verschiedene Menschen verschieden ist. Ich habe in Fig. 72 *a* die aus meinem rechten, in *b* die aus meinem linken Auge abgebildet. Die nach der Peripherie gekehrten Ränder der hellen Partien eines von weißem Lichte entworfenen Zerstreuungsbildes dieser Art sind blau gesäumt, die dem Zentrum zugekehrten rotgelb. Die Figur scheint bei den meisten Menschen in der Richtung von oben nach unten länger zu sein als von rechts nach links. Ist das Licht schwach, so kommen nur die hellsten Stellen der Strahlenfigur zur Wahrnehmung, und man sieht mehrere Bilder des hellen Punktes, von denen

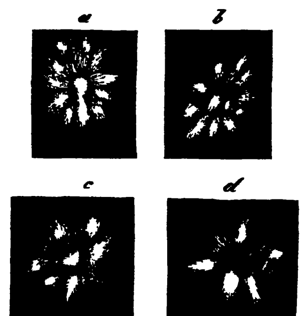


Fig. 72.

gewöhnlich eines heller ist als die anderen. Ist das Licht dagegen sehr stark, läßt man z. B. direktes Sonnenlicht durch eine feine Öffnung fallen, so fließen die Strahlen des Sterns ineinander, rings umher entsteht außerdem ein aus unzähligen, äußerst feinen und bunt gefärbten Linien bestehender Strahlenkranz von viel größerer Ausdehnung, den wir unter dem Namen des Haarstrahlenkranzes von dem sternförmigen Zerstreuungsbilde unterscheiden wollen.

Hat man die sternförmige Figur oder bei schwächerem Lichte die mehrfachen Bilder des leuchtenden Punktes vor sich, und schiebt ein undurchsichtiges Blatt von unten her vor das Auge, so schwindet zuerst der scheinbar untere Teil des Zerstreuungsbildes, also der obere Teil des entsprechenden Netzhautbildchens. Schiebt man das Blatt von oben, von rechts oder links vor das Auge, so schwindet dementsprechend immer der obere, rechte oder linke Teil des Zerstreuungsbildes.

Anders verhält sich der ausgedehntere Haarstrahlenkranz, den sehr intensives Licht erregt. Wenn man die Pupille von unten her verdeckt, verschwindet keineswegs der untere Teil dieses Kranzes, sondern nur der untere Teil des zentralen hellen Sterns. Die Erscheinung wird aber dadurch gestört und verändert, daß sehr lebhafte Diffraktionsbilder sich entwickeln, welche von der verengerten und veränderten Gestalt der Pupille bedingt sind.

Die strahlige Gestalt der Sterne und ferner Laternen gehört mit zu diesen Erscheinungen.

2) Ist das Auge für eine größere Entfernung als die des leuchtenden Punktes akkommodiert (zu welchem Zwecke man bei fernen leuchtenden Punkten eine schwache Konkavlinse vor das Auge bringen kann), so erscheint eine andere strahlenförmige Figur (Fig. 72 *c* aus meinem rechten, *d* aus meinem linken Auge), deren größere Ausdehnung meist horizontal ist. Verdeckt man die Pupille von einer Seite her, so schwindet die entgegengesetzte Seite des vom Beobachter gesehenen Zerstreuungsbildes, d. h. die der verdeckten Hälfte der Pupille gleichseitigen Teile des Netzhautbildes. Diese Figur wird also von Strahlen gebildet, welche die Achse des Auges noch nicht geschnitten haben. Wenn sich Tränenflüssigkeit über das Auge verbreitet hat, oder durch häufiges Blinzeln mit den Lidern Fetttröpfchen aus den Meibomschen Drüsen auf die Hornhaut gekommen sind, ist die Strahlenfigur meist größer, unregelmäßiger, wird durch Blinzeln bedeutend verändert, und wenn man die Pupille von der Seite her verdeckt, verschwindet dadurch nicht bloß eine Seite der Strahlenfigur.

3) Bringt man den leuchtenden Punkt in eine solche Entfernung, daß man das Auge für sie akkommodieren kann, so sieht man bei mäßigem Lichte einen kleinen rundlichen hellen Fleck ohne Unregelmäßigkeiten. Bei stärkerem Lichte dagegen bleibt sein Bild bei jeder Weise der Akkommodation strahlig, und man findet bei allmählichen Akkommodationsänderungen nur, daß die vertikal verlängerte Strahlenfigur, welche bei kürzerer Sehweite vorhanden ist, sich verkleinert, rundlicher wird und dann in die horizontal verlängerte Strahlenfigur übergeht, die einer größeren Sehweite angehört.

4) Wenn man eine feine Lichtlinie betrachtet, kann man sich die Erscheinungen, welche entstehen, leicht dadurch im voraus entwickeln, daß man die strahligen Zerstreuungsbilder für alle einzelnen Punkte der Linie konstruiert denkt, die sich nun zum Teile decken. Die helleren Teile der Zerstreuungsbilder fließen dann zu Lichtlinien zusammen, welche als mehrfache Bilder der

hellen Linie erscheinen. Die meisten Augen sehen zwei, manche in gewissen Lagen fünf oder sechs solche Doppelbilder.

Um den Zusammenhang der Doppelbilder von Linien mit den strahligen Bildern von Punkten gleich durch den Versuch anschaulich zu machen, schneide man in ein dunkles Papierblatt eine feine gerade Spalte, und ein wenig von deren Ende entfernt, in Richtung ihrer Verlängerung, steche man ein rundes Löchelchen ein, wie Fig. 71*a*. Von Ferne sehend, bemerkt man dann, daß die Doppelbilder der Linie genau denselben Abstand voneinander haben, wie die hellsten Stellen der strahlenförmigen Zerstreuungsfigur des Punktes, und daß letztere in der Verlängerung der ersteren liegen, wie in Fig. 73*b*, wo in der Zerstreuungsfigur des hellen Punktes nur die hellsten Teile des Sterns, Fig. 72*a*, sichtbar sind.

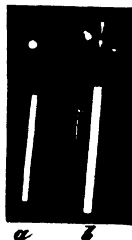


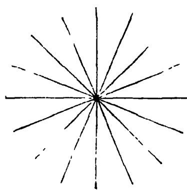
Fig. 73.

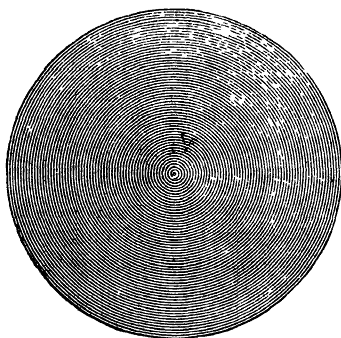
Hierher gehören die mehrfachen Bilder, welche die meisten Augen von den Hörnern der Mondsichel sehen.

An den Grenzen heller Flächen, für welche das Auge nicht ganz vollkommen akkommodiert ist, machen sich die Doppelbilder auch mitunter dadurch bemerklich, daß am Rande der hellen Fläche der Übergang von Helligkeit zu Dunkel in zwei oder drei Absätzen geschieht.

Weitere hierhergehörige Erscheinungen folgen unten bei der Lehre von der Irradiation.

5) Das Auge ist im allgemeinen nicht gleichzeitig für horizontale und vertikale Linien, welche in gleicher Entfernung von ihm sich befinden, akkommodiert. Man betrachte aufmerksam eine Anzahl gerader Linien, die sich in einem Punkte schneiden, wie Fig. 74, in einer Entfernung, für welche man gut akkommodieren kann. Man wird bemerken, daß man sie nacheinander alle scharf begrenzt und dunkel schwarz sehen kann, während man aber eine von ihnen scharf sieht, sind im allgemeinen die anderen nicht scharf. Ist man darin geübt, sich der Akkommodationsänderungen seines Auges bewußt zu werden, so bemerkt man, daß das Auge eine größere Sehweite annimmt, um die seinem horizontalen Durchmesser parallelen Linien deutlich zu sehen, mehr für die Nähe dagegen akkommodiert, um die senkrechten zu sehen.


Fig. 74.


Fig. 75.

Man muß deshalb eine vertikale Linie weiter vom Auge entfernen als eine horizontale, wenn man sie beide zu gleicher Zeit deutlich sehen will. Ad. Fick sah vertikale Linien in 4,6 m Entfernung deutlich, und zugleich horizontale in 3 m, ich selbst vertikale in 0,65 m, horizontale in 0,54 m Entfernung.

Zeichnet man eine große Zahl feiner konzentrischer Kreislinien in gleichen Abständen voneinander auf Papier, wie in Fig. 75, und betrachtet sie in einer Entfernung, für die man gut akkommodieren kann, so erscheinen eigentümliche strahlige Scheine auf der Figur. Bei genauerer Betrachtung erkennt man, daß in den lichteren Radien die schwarzen und weißen Linien scharf von-

einander geschieden sind, dazwischen aber liegen hellgraue wolkige Stellen, in denen die schwarzen Linien mehr verwaschen erscheinen. Läßt man die Akkommodation des Auges oder die Entfernung der Figur vom Auge etwas wechseln, so werden andere Stellen der Figur klar, und es entsteht dadurch der Anschein, als ob die klaren Strahlen sich sehr schnell hin und her bewegten. Richtet man das Auge für eine beträchtlich weitere Entfernung ein, als in der die Figur liegt, so sieht man 8 bis 10 Sektoren mit deutlichen Linien; wo diese aneinander stoßen, sind sie nebelig, aber man erkennt, daß die schwarzen Linien des einen Sektors nicht mit denen des nächsten zusammenpassen. Die innersten Kreise bekommen dadurch ein seltsam verzerrtes Ansehen.

Daß die beschriebenen Erscheinungen von einer Asymmetrie des Auges herrühren, ist zunächst klar. Ein optisches Instrument, welches um seine Achse ringsum symmetrisch gebaut ist, kann für einen in der Achse liegenden Lichtpunkt allerdings Zerstreuungsfiguren entwerfen, die aber selbst symmetrisch gegen die Achse und kreisförmig gebildet sein müssen.

Was zunächst die strahlige Bildung der kleinen Zerstreuungskreise betrifft, so müssen wir trennen, was davon dauernd ist und jederzeit bei reiner Hornhaut wieder erscheint, und andererseits den Teil der Erscheinung, der durch Tränenfluß und Blinzeln der Augenlider verändert wird. Der letztere Teil rührt offenbar her von Tropfen wässriger oder fetter Flüssigkeit, oder von Unreinigkeiten, die sich auf der Hornhaut angesammelt haben. Man kann diese Erscheinungen nachahmen, wie A. Fick gezeigt hat, wenn man mit einer Glaslinse, auf deren Oberfläche man Wassertropfen ausgebreitet hat, das Bild eines hellen Punktes entwirft.

Dergleichen vergängliche Erscheinungen kommen in den Strahlenfiguren meiner eigenen Augen seltener vor, vielmehr sehe ich gewöhnlich immer dieselben Figuren wieder, welche ich oben in Fig. 72 *a* bis *d* abgebildet habe, und welche durch ihre strahlige Form wohl zunächst an den strahligen Bau[1] der Linse erinnern. In der Tat konnte ich mich überzeugen, daß die wesentlichsten Züge dieser Strahlenfiguren von Unregelmäßigkeiten der Linse herrührten, indem ich die feine Öffnung, durch welche das Licht fiel, sehr nahe an das Auge brachte; dann sieht man in dem Zerstreuungskreise die sogenannten entoptischen Erscheinungen, welche im nächsten Paragraphen beschrieben werden sollen, Dort wird auch gezeigt werden, in welcher Weise man eine sichere Kenntnis von dem Orte der Objekte im Auge erhalten kann, welche diese Erscheinungen veranlassen. Es fand sich nun, daß gewisse helle und dunkle Streifen, welche dem entoptischen Bilde der Linse angehörten, bei allmählich steigender Entfernung der Öffnung vom Auge übergingen in die hellen und dunklen Flecken und Streifen der in Fig. 72 *c* und *d* abgebildeten Sternfiguren. Abbildungen dieses Übergangs hat schon Th. Young[2] gegeben.

Was die zweite Klasse der oben beschriebenen Erscheinungen betrifft, welche sich auf die verschiedene Vereinigungsweite der Strahlen nach der vertikalen und horizontalen Richtung beziehen, so läßt sich deren Grund noch nicht mit gleicher Bestimmtheit angeben. Im allgemeinen muß eine solche Art der Abweichung eintreten, so oft Licht an krummen Flächen gebrochen wird, deren Krümmung nach verschiedenen Richtungen hin verschieden ist, oder auch an Kugelflächen, so oft es schief auf die Fläche fällt. An beiderlei Ur-

[1] S. oben S. 129.
[2] *Philos. Transact.* 1801. I. pl. VI.

sachen kann man im Auge denken. Horizontale und vertikale Meridianschnitte der brechenden Flächen des Auges haben vielleicht nicht dieselben Krümmungsradien; und wir wissen außerdem, daß das menschliche Auge nicht ganz genau zentriert ist, und daß der Ort des direkten Sehens nicht in der Linie liegt welche dem Begriffe einer Augenachse am nächsten kommt.

Anzuführen ist, daß Th. Young[1], in dessen Auge die beiden Vereinigungsweiten ziemlich beträchtlich differierten, durch einen Versuch ermittelt hat, daß seine Hornhaut diese Differenz nicht bewirke. Er brachte nämlich das Auge unter Wasser, wobei die Brechung in der Hornhaut fast vollständig aufgehoben ward, und fand, daß die Differenz der Vereinigungsweiten noch in gleichem Maße fortbestand.

Man kann übrigens, wie Th. Young ebenfalls bemerkt hat, diesen Fehler des Auges aufheben, wenn man Linsengläser unter einer gewissen Neigung gegen die Augenachse vor das Auge bringt. Ich fand, daß der Versuch leicht gelingt, und daß ich es durch eine passende Haltung eines schwachen Konkavglases dahin bringen konnte, ein System feiner senkrechter Linien gleichzeitig mit einem daneben befindlichen von horizontalen Linien gleich deutlich zu sehen.

Schließlich ist noch die unvollkommene Durchsichtigkeit der Augenmedien als Grund monochromatischer Abweichungen anzuführen. Die Fasern der Hornhaut und Linse scheinen allerdings durch eine Zwischensubstanz von ziemlich gleichem Brechungsvermögen verbunden zu sein, so daß bei mäßiger Lichtstärke diese Teile vollkommen homogen und klar erscheinen. Wenn man aber starkes Licht durch eine Brennlinse auf sie konzentriert, wird das an den Grenzen ihrer Elementarbestandteile reflektierte Licht stark genug, um sie weißlich trübe erscheinen zu lassen. Von dem durch sie gehenden Lichte wird also, wie dieser Versuch zeigt, ein Teil diffus zerstreut, und muß auch andere Teile der Netzhaut treffen, auf welche das regelmäßig gebrochene Licht nicht fällt. In der Tat bemerkt man, wenn man ein intensives Licht vor einem ganz dunklen Grunde betrachtet, den Grund mit einem nebeligen weißen Scheine übergossen, der in der Nähe des Lichts am hellsten ist. Sowie man das Licht verdeckt, erscheint der umgebende Grund in seiner natürlichen Schwärze. Ich glaube diese Erscheinung durch zerstreutes Licht erklären zu müssen[2].

Ich will die Theorie der Brechung an nicht kugeligen Flächen und der Brechung bei schiefem Einfall an Kugelflächen hier nicht vollständig entwickeln, weil sie vorläufig für die Untersuchung der Brechung im Auge nur von geringem Nutzen sein würde, solange wir nicht genauere Bestimmungen für die Form der brechenden Flächen haben. Es genüge hier, eine derartige Brechung in zwei einfachen Fällen zu betrachten, aus denen die betreffenden Verhältnisse anschaulich werden.

Wir betrachten zuerst die Brechung im Scheitel eines ungleichachsigen Ellipsoides. Es sei in Fig. 76 die Linie gb eine Achse des Ellipsoides, in deren Verlängerung bei p der leuchtende Punkt liegt. Die Ebene der Zeichnung sei ein Hauptschnitt des Ellipsoides, so daß auch noch eine zweite Achse des Ellipsoides gh in dieser Ebene liegt. Da nun die Normalen solcher Punkte der ellipsoidischen Fläche, welche in einem Hauptschnitte liegen, auch in demselben Hauptschnitte liegen, so liegen die Normalen der Kurve bch in diesem Falle in der Ebene der Zeichnung. Wenn von p aus ein Strahl auf den Punkt c

[1] *Philos. Transact.* 1801. P. I. p. 40.

[2] Helmholtz in Poggendorffs Ann. LXXXVI. 509.

fällt, so liegt der gebrochene Strahl in der durch den leuchtenden Punkt und das Einfallslot gelegten Ebene, d. h. in der Ebene der Zeichnung, und schneidet also die Achse bg in irgend einem ihrer Punkte q. Dies würde nicht der Fall sein, wenn die Ebene der Zeichnung nicht eben ein Hauptschnitt wäre.

Ist ad die Normale im Punkte c, so wird die Lage des gebrochenen Strahls nun weiter durch die Bedingung bestimmt, daß

$$\sin \angle\, pcd = n \sin \angle\, acq$$

sein muß, wenn n das Brechungsverhältnis bezeichnet. Diese Bedingung ist also dann ganz dieselbe wie für Rotationsflächen. Die nahe senkrecht bei b auffallenden Strahlen werden dann also einen gemeinschaftlichen Vereinigungspunkt in der Achse haben, dessen Entfernung von dem Krümmungsradius $r_{,}$ der Kurve bch in b abhängt. Ist p unendlich entfernt, so ist die Vereinigungsweite der Strahlen, d. h. die Brennweite in dem vorliegenden Hauptschnitte gleich $\frac{n r_{,}}{n-1}$.

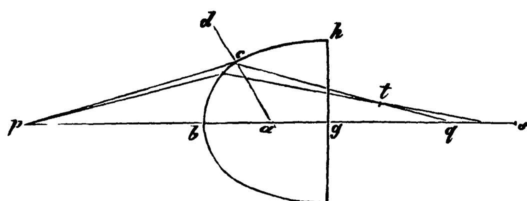


Fig. 76.

Für die Strahlen von p, welche in dem anderen Hauptschnitte verlaufen, der durch bq und die dritte Achse gelegt ist, verhält sich wieder alles ebenso, nur hat der Krümmungsradius im Scheitel der Fläche einen anderen Wert $r_{,,}$, und die Brennweite der Strahlen in diesem zweiten Hauptschnitte ist gleich $\frac{n r_{,,}}{n-1}$.

Der Strahl pq wird also von den Strahlen, die in der Ebene der Zeichnung unmittelbar neben ihm liegen, in einem Punkte, etwa q, geschnitten; von den Strahlen dagegen, die in einer durch ihn senkrecht zur Ebene der Zeichnung gelegten Ebene ihm unmittelbar benachbart sind, nicht in demselben Punkte q, sondern in einem anderen Punkte, etwa in s.

Läßt man unter diesen Umständen die Strahlen von p durch eine kleine kreisförmige Öffnung, deren Mittelpunkt sich in der Achse bei b befindet, auf die brechende Fläche fallen, so ist der Querschnitt des Strahlenbündels unmittelbar bei b ein Kreis, zwischen b und q eine Ellipse, deren senkrecht zur Ebene der Zeichnung gestellte Achse größer ist als die in der Ebene liegende. Die Ellipse wird immer kleiner und zugleich gestreckter, je mehr wir uns dem Punkte q nähern. In q ist der Querschnitt des Strahlenbündels eine zur Ebene der Zeichnung senkrechte Linie. Weiterhin wird er wieder eine Ellipse, deren größere Achse senkrecht zur Ebene der Zeichnung steht, die schnell einem Kreise ähnlicher wird, ungefähr in der Mitte zwischen q und s wirklich ein Kreis wird und sich dann in eine Ellipse verwandelt, deren längere Achse in der Ebene der Zeichnung liegt, die sich gegen s hin immer mehr streckt, in s selbst sich in eine gerade Linie zusammenzieht und jenseits s allmählich wieder breiter wird und sich immer mehr der Kreisform nähert.

Ähnlich verhält es sich mit Strahlenbündeln, welche schief auf eine kugelige Fläche fallen. Nehmen wir an, in Fig. 76 sei bch eine Kugelfläche und pc ein solcher schief auffallender Strahl. Wir wissen[1], daß die Strahlen, welche

[1] S. oben S. 51. Fig. 32.

in der Ebene der Zeichnung unmittelbar neben *c* auf die Fläche fallen, sich mit dem Strahle *pc* nach der Brechung nicht im Brennpunkte und in der Zentrallinie *pq*, sondern in einem seitwärts von der Achse liegenden Punkte der kaustischen Fläche schneiden. Es sei dieser Punkt *t*. Denken wir uns dagegen die ganze Figur um die Linie *ap* gedreht, so tritt der Strahl *pc* allmählich an die Stelle anderer Strahlen, welche mit ihm gleich weit von dem Punkte *b* entfernt auf die Fläche fallen, und der gebrochene Strahl *cq* tritt an die Stelle der dazu gehörigen gebrochenen Strahlen. Diese Strahlen schneiden sich also alle nur im Punkte *q*.

Während also die in der Ebene der Zeichnung dem Strahle *pc* unmittelbar benachbarten Strahlen ihn in *t* schneiden, schneiden ihn diejenigen benachbarten Strahlen, die vor und hinter der Ebene der Zeichnung in gleicher Entfernung von *b* einfallen, in *q*, und endlich können wir hinzusetzen, daß ihn diejenigen Strahlen, welche weder in der Ebene der Zeichnung noch in gleicher Entfernung von *b*, wie *bc* ist, auffallen, gar nicht schneiden.

Es ist noch zu erörtern, inwiefern die Diffraktion des Lichts in der Pupille von Einfluß auf die monochromatischen Abweichungen des Lichts sein kann. Zunächst dürfte wohl die Frage aufgeworfen werden, ob die strahlige Form der kleinen Zerstreuungsfiguren nicht von den kleinen Einschnitten des Pupillarrandes veranlaßt sei. In der Tat sieht man eine ausgedehntere strahlige Figur, wenn man nach einem sehr hellen Lichtpunkte durch eine Öffnung sieht, welche kleiner als die Pupille ist, und deren Ränder nicht ganz feinpoliert sind; doch besteht eine solche Strahlenfigur in der Regel aus sehr feinen, mehr haarförmigen Strahlen mit lebhaften Farben, ähnlich dem schon oben beschriebenen Haarstrahlenkranze des Auges, der sehr helle Lichtpunkte umgibt, auch wenn man sie nicht durch eine künstliche Öffnung betrachtet. Dreht man die Öffnung dann um ihren Mittelpunkt, so dreht sich der ganze Strahlenkranz mit ihr, woraus sich eben ergibt, daß dieser Strahlenkranz von den Rändern der Öffnung herrührt.

Von dem Vorhandensein einer Diffraktion des Lichts, welche durch die feine Faserung der Kristallinse veranlaßt wäre, konnte ich mich an meinem eigenen Auge nicht überzeugen. Wenn ich durch eine glatt gebohrte Öffnung einer Metallscheibe nach einem kleinen lichten Punkte sehe, so dreht sich immer die ganze Diffraktionsfigur, wenn ich die Scheibe drehe. Gehörten einzelne Züge der Diffraktionsfigur den Fasern der Hornhaut oder Linse an, so müßten diese stehen bleiben. Dagegen beschreibt Beer[1] aus seinem Auge Diffraktionserscheinungen, welche er von einer Faserung der Augenmedien herleitet.

Diese Diffraktionsphänomene unterscheiden sich aber von denen der kleinen Zerstreuungskreise wesentlich durch den Umstand, daß letztere beim Verdecken der Pupille von einer Seite her auch von einer Seite her verschwinden, während die andere Seite ungestört bleibt. Wenn ein feines Fäserchen oder ein feiner Einschnitt dagegen Diffraktionsstrahlen bildet, so erstrecken sich diese niemals bloß nach einer Richtung, sondern stets auch nach der entgegengesetzten, weil jede Unterbrechung einer Lichtwelle stets nach entgegengesetzten, meist nach allen Seiten hin ihren Einfluß ausübt. Die Haarstrahlenfiguren zeigen nun wirklich diesen Charakter; sobald man die Pupille anfängt zu bedecken, werden mehr oder weniger alle Teile der Figur gestört und verändert.

[1] Poggendorffs Ann LXXXIV. 518.

Außer der Diffraktion, welche Unregelmäßigkeiten des Randes der Pupille bewirken, kommt aber auch noch in Betracht, daß die ganze Pupille als enge kreisförmige Öffnung Diffraktion hervorrufen kann. Jedesmal, wo Strahlen eines leuchtenden Punktes durch eine oder mehrere brechende Flächen von begrenzter Apertur, die übrigens vollkommen achromatisch und aplanatisch sein mögen, gebrochen werden, entsteht im Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen kein punktförmiges Bild, sondern wegen der Diffraktion am Rande der Apertur eine kleine lichte Figur, die abwechselnd helle und dunkle Stellen zeigt, deren Form und Lage im allgemeinen von der Größe und Gestalt der Öffnung abhängig sind. Ist die letztere kreisförmig, wie bei den optischen Instrumenten und im Auge gewöhnlich der Fall ist, so besteht die Diffraktionsfigur aus einer hellen Kreisscheibe, umgeben von mehreren dunklen und hellen Ringen von schnell abnehmender Helligkeit. Ist d der Durchmesser der Apertur des brechenden Systems, r der Abstand des Bildes von derselben, l die Wellenlänge des Lichts, so ist der Durchmesser δ der mittleren Kreisscheibe nach der durch die Versuche bestätigten Theorie dieser Erscheinungen

$$\delta = 2{,}440 \frac{l\,r}{d} \,.$$

Setzen wir für mittleres Licht $l = {}^1/_{2000}$ mm und r für das Auge gleich 20 mm, so wird, wenn δ und d in Millimetern ausgedrückt werden,

$$\delta = 0{,}0244 \cdot \frac{1}{d} \,.$$

Bei der kleinsten Pupillenweite, die wir gleich 2 mm setzen wollen, würde $\delta = 0{,}0122$ mm werden. Diese Größe des Zerstreuungskreises entspricht einem Gesichtswinkel von 2 Min. 6 Sek., und ist gleich der Größe des Zerstreuungskreises, den in einem für unendliche Entfernung adaptierten Auge ein 25 m entfernter Lichtpunkt entwirft. Da der Gesichtswinkel der kleinsten wahrnehmbaren Distanzen etwa 1 Min. beträgt, so muß bei engster Pupille die Diffraktion eben anfangen, die Genauigkeit des Sehens zu beeinträchtigen.

Zu den monochromatischen Abweichungen gehören auch noch die Lichtstreifen, welche nach oben und unten von einem lichten Körper ausgehen, wenn man die Augenlider halb schließt. Sie rühren von der Brechung des Lichts in dem konkaven Flüssigkeitsrande her, der sich an den Lidern erhebt. Dieser Rand wirkt wie ein kleines Prisma oder eine Reihe kleiner Prismen von veränderlichem Winkel, und lenkt das ihn treffende Licht stark von seinem Wege ab.

Die Messungen, welche von verschiedenen Physikern über die Ungleichheit der Brennweite horizontal und vertikal divergierender Strahlen ausgeführt worden sind, haben ergeben, daß verschiedene Individuen sich in dieser Beziehung sehr verschieden verhalten. Bei einigen fehlen diese Abweichungen ganz und gar, wie z. B. bei BRÜCKE[1], und wo sie vorkommen, zeigen sie sich in entgegengesetztem Sinne.

TH. YOUNG gibt an, daß sein Auge zu einem Focus sammele vertikal divergierende Strahlen eines 10 engl. Zoll (304 mm) entfernten leuchtenden Punktes, und horizontal divergierende eines 7 Zoll (213 mm) entfernten. Um die Größe dieses Unterschieds unabhängig von den Sehweiten seines Auges auszudrücken, berechnet er die Brennweite eines Glases, welches imstande wäre, als Brille gebraucht, die eine Entfernung auf die andere zu reduzieren, und findet 23 engl. Zoll (700 mm). Um den Fehler

[1] Fortschritte der Physik im Jahre 1845. Bd. I. S. 211.

seines Auges zu korrigieren, würde er ein Brillenglas mit einer konvexen Zylinderfläche von horizontaler Achse oder ein solches mit einer konkaven Zylinderfläche und vertikaler Achse von der angegebenen Größe der Brennweite gebraucht haben. A. Fick fand, daß er 4,6 m entfernte Vertikallinien und 3 m entfernte Horizontallinien gleichzeitig deutlich gesehen habe. Ich selbst sehe gleichzeitig deutlich 0,65 m entfernte Vertikalien und 0,54 m entfernte Horizontallinien. Der Sinn der Abweichung ist in diesen beiden Fällen der entgegengesetzte wie bei Th. Young, die Größe eine viel geringere. Durch die Fokallänge einer zylindrischen Linse ausgedrückt, entspricht die Abweichung in Ficks Auge einer Brennweite von 8,6 m und in meinem Auge 3.19 m. Dergleichen Messungen sind leicht auszuführen, indem man etwa $^1/_2$ Zoll über einem horizontalen, hinreichend langen Brettchen eine feine Nähnadel horizontal befestigt, und indem man sie vom Ende des Brettchens her betrachtet, eine vertikale Nadel vor ihr oder hinter ihr in solcher Entfernung einsticht, daß beide gleich deutlich erscheinen.

A. Fick findet, daß ein unbefangen blickendes Auge sich meist für Vertikallinien akkommodiert. Um annähernd die Entfernung der beiden Brennebenen berechnen zu können, wollen wir annehmen, daß Listings schematisches Auge für Vertikallinien akkommodiert sei. Machen wir die Abweichung der horizontal und vertikal divergierenden Strahlen darin ebenso groß wie bei den genannten drei Beobachtern, so würde liegen der Brennpunkt für horizontale Strahlen nach den Angaben von

Th. Young	0,422 mm	vor dem anderen.
A. Fick	0.035 mm	hinter dem anderen.
H. Helmholtz	0,094 mm	hinter dem anderen.

Diese Abweichungen sind, wie man sieht, kleiner als die des roten und violetten Brennpunktes (0,6 mm). Sie beeinträchtigen die Schärfe des Sehens auch so lange nicht sehr wesentlich, als es darauf ankommt, Linien voneinander zu unterscheiden, die irgend einer Hauptrichtung folgen. Nur wo gekreuzte Linien gleichzeitig scharf gesehen werden sollen, treten sie hindernd auf.

Die mehrfachen Bilder eines Punktes oder einer Linie bei ungenauer Akkommodation haben schon de la Hire[1] und Jurin[2] erwähnt, aber ohne die richtige Erklärung zu finden. Später beschrieb und bildete Th. Young[3] die Form der Zerstreuungsfiguren ab bei verschiedener Entfernung des leuchtenden Punktes und spricht die Vermutung aus, daß die Strahlen von leichten Ungleichförmigkeiten der vorderen Linsenfläche herrühren möchten. Später erwähnt sie Hassenfratz[4], welcher denselben Grund voraussetzt und sie als Schnittlinien von zwei kaustischen Flächen bezeichnet. Purkinje[5] beschreibt die Erscheinungen der mehrfachen Bilder, ferner die, welche beim Anschauen feiner paralleler Linien eintreten, und bildet die Sternfigur ab; er glaubt sie am besten von Hornhautfacetten ableiten zu können. Mehrfache Bilder einer hellen Linie hat auch Péclet[6] gesehen und erkannt, daß sie durch eine besondere Struktur der brechenden Flächen veranlaßt sein müßten. Ebenso Niedt[7], Guérard[8], Fliedner[9]. Letzterer hat die hierher gehörigen Erscheinungen ausführlich in ihrem Zusammenhange beschrieben. Trouessart[10] glaubt einen netzförmigen

[1] *Accidens de la vue.* p. 400.

[2] Smiths *Optics. Essay on distinct and indistinct vision.* p. 156.

[3] *Philos. Transactions.* 1801. I. p. 43. Pl VI.

[4] *Ann. de Chimie.* 1809. T. LXXII. p. 5.

[5] Beiträge zur Kenntnis des Sehens. S. 113—119. Neue Beiträge z. Kenntnis d. Sehens. S. 139—146. 173.

[6] *Ann. d. Chimie et d. Phys.* LIV. 379. — Poggendorffs Ann. XXXIV. 557.

[7] De dioptricis oculi coloribus ejusque Polyopia. Dissert. Berolini 1842.

[8] *Institut.* 1845. No. 581. p. 64.

[9] Poggendorffs Ann. LXXXV. 321. 460. LXXXVI. 336. *Cosmos.* I, 333.

[10] *C. R. de l'Acad. d. sciences.* XXXV. 134—136, 398. *Archive de Genève.* XX. 305. *Institut.* 1852. p. 304.

dunklen Schirm hinter den brechenden Flächen des Auges annehmen zu müssen, dessen mehrfache Öffnungen nach dem Prinzipe des SCHEINERschen Versuchs die mehrfachen Bilder veranlaßten. Die Ansicht über ihre Entstehung von A. FICK[1] ist oben schon erwähnt. Erwähnt werden hierher gehörige Erscheinungen noch von AIMÉE[2] und CRANMORE[3]. Eine ganz eigentümliche Ansicht über den Ursprung der mehrfachen Bilder, die *Polyopia monophthalmica* der Augenärzte, hat STELLWAG VON CARION[4] aufgestellt. Er glaubte beobachtet zu haben, daß die verschiedenen Bilder nach verschiedenen Richtungen polarisiertes Licht erhalten. Indessen ist dies nicht richtig; Herr STELLWAG ist bei seinen Versuchen wahrscheinlich durch eine schlecht geschliffene Turmalinplatte mit schwach gewölbten Flächen oder Streifen im Innern getäuscht worden. Eine schwach zylindrische Fläche einer solchen Platte würde, vor das Auge gehalten, bald in horizontaler, bald in vertikaler Richtung die Strahlen zur Vereinigung bringen und dadurch einzelne der Doppelbilder beseitigen können. Um den Einfluß solcher Mängel der Platte aufzuheben, stelle man sie zwischen das Licht und einen Schirm mit enger Öffnung, so daß polarisiertes Licht durch die Öffnung fällt, während der Beobachter diese Öffnung aus hinreichender Entfernung betrachtet, um sie sternförmig zu sehen. Man lasse nun die polarisierende Platte herumdrehen, so daß die Polarisationsrichtung des Lichts wechselt. Dann ist nicht der geringste Einfluß der Polarisationsrichtung auf die Doppelbilder zu erkennen. Übrigens lassen sich die von STELLWAG angeblich gewonnenen Resultate auch nicht mit den bekannten Gesetzen der Doppelbrechung vereinigen. Widerlegt worden ist er durch GUT[5]. Die medizinische Literatur über das pathologische Vorkommen auffallenderer *Diplopia monophthalmica* findet sich in dem Aufsatze von STELLWAG zusammengestellt.

Über Diffraktionserscheinungen des Auges sind Beobachtungen gemacht von BAUDRIMONT[6], WALLMARK[7], BEER[8]. Die Lichtstreifen, welche bei halb vorgeschobenen Augenlidern durch den konkaven Tränenrand an ihren Rändern entstehen, hat MEYER[9] (in Leipzig) besprochen.

Die Asymmetrie des Auges in seinen verschiedenen Meridianebenen finde ich zuerst von TH. YOUNG[10] besprochen, welcher dabei anführt, daß ein Herr CARY ihm als Tatsache angeführt habe, daß viele Personen ihre Brillengläser schief gegen das Auge halten müßten, um gut durch sie zu sehen. Weitere darauf bezügliche Beobachtungen finden sich von AIRY[11], FISCHER[12], CHALLIS[13], HEINEKEN[14], HAMILTON[15], SCHNYDER[16], welcher letztere Zylinderlinsen dagegen verfertigen ließ, endlich A. FICK[17]. Eine vollständigere Zusammenstellung der Beobachtungen findet sich in FECHNERS Zentralblatt (Jahrgang 1853, p. 73—85, 96—99, 374—379, 558—561).

---

[1] HENLE u. PFEUFFER, Zeitschrift. N. Folge V. S 277.
[2] *Ann. d. Chimie et d. Physique.* LVI. 108. — POGGENDORFFS Ann. XXXIII. S. 479.
[3] *Philos. Magazine.* (3) XXXVI. 485.
[4] Wiener Sitzungsberichte. VIII. 82. Denkschriften d. k. k. Akad. V. 2. p. 172.
[5] Über Diplopia monophthalmica. Dissert. Zürich 1854.
[6] *C. R. d. l'Acad. d. sc.* XXXIII. 496; *Institut.* No. 931; *Phil. Magaz.* (4) II. 575.
[7] POGGENDORFFS Ann. LXXXII. 129.
[8] POGGENDORFFS Ann. LXXXIV. 518.
[9] POGGENDORFFS Ann. LXXXIX. 429.
[10] *Phil. Transact.* 1801. I. p. 39.
[11] *Edinb. Journal of Sc.* XIV. p. 322.
[12] Berl. Denkschriften 1818 u. 1819. S. 46.
[13] *Transact. of the Cambridge Phil. Soc.* II.: *Phil. Magaz.* (3) XXX. 366.
[14] *Phil. Magaz.* XXXII. 318.
[15] FRORIEPS Notizen. VII. 219.
[16] Verhandl. d. schweizer. naturf. Ges. 1848. S. 15; FRORIEPS Notizen. X. 346; *Arch. de Genève.* X. 302.
[17] De errore quodam optico asymmetria bulbi effecto. Marburgi 1851; HENLE u. PFEUFFER Zeitschrift. N. Folge. Bd. II. S. 83.

Die Frage nach der sphärischen Abweichung des Auges in dem Sinne. wie dieser Ausdruck für künstliche Instrumente gebraucht wird, verliert neben den beschriebenen viel gröberen Abweichungen, die im Auge vorkommen, ihre Wichtigkeit. Außer der im vorigen Paragraphen schon erwähnten Beobachtung von TH. YOUNG mit seinem Optometer, wonach dessen Faden, durch vier Öffnungen gesehen, vierfach erschien und sich die vier scheinbar vorhandenen Fäden bei der Akkommodation für die Nähe nicht in einem Punkte kreuzten, hat auch VOLKMANN[1] sich bemüht, durch Versuche über die Frage zu entscheiden, ob das Auge sphärische Aberration besitze. Er und einige andere Personen blickten durch einen Schirm mit vier Öffnungen, die in einem Bogen standen, nach einer Nadel, die in verschiedene Entfernungen vom Auge gebracht wurde. Wenn das Auge die mittleren Strahlen eher vereinigt als die Randstrahlen, werden sich bei dem Versuche, indem man die Nadel vom Auge entfernt und dem Punkte des deutlichen Sehens nähert, die Bilder der Nadel, welche den mittleren Öffnungen angehören, eher vereinigen als die der seitlichen Öffnungen. Werden die Randstrahlen eher vereinigt als die Zentralstrahlen, so wird es umgekehrt sein. VOLKMANN fand bei verschiedenen Individuen in dieser Beziehung ein entgegengesetztes Verhalten. Bei regelmäßig gebildeten brechenden Rotationsflächen würden die angegebenen Versuche von YOUNG und VOLKMANN in der Tat über die Art und Größe der sphärischen Abweichung des Auges Aufschluß geben. Indessen werden in den meisten Meridianebenen der meisten Augen die Punkte, wo die gebrochenen Strahlen den Zentralstrahl treffen, gar keine kontinuierliche Reihe bilden, so daß der Begriff der sphärischen Abweichung hier gar nicht paßt.

1694. DE LA HIRE, *Accidents de la vue* in den *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1694. p. 400.
1738. JURIN, *Essay on distinct and indistinct vision.* p. 156 in R. SMITHS *Optics.*
1801. TH. YOUNG in *Philos. Transactions for* 1801. I. p. 43*.
1809. HASSENFRATZ, *Ann. de Chimie.* T. LXXII. p. 5.
1818. FISCHER, Berliner Denkschriften für 1818 u. 1819. S. 46.
1819. PURKINJE, Beiträge zur Kenntnis des Sehens. Prag. S. 113—119*.
1824. PÉCLET, *Ann. d. Chimie et d. Phys.* LIV. 379; POGGENDORFFS Ann. XXXIV. 557.
AIMÉE, *Ann. d. Chim. et d. Phys.* LVI. p. 108.
1825. PURKINJE, Neue Beiträge zur Kenntnis des Sehens. Berlin. S. 139—146. 173*.
BREWSTER, *Edinb. Journal of Science.* XIV. p. 322. (Über AIRYS Auge).
1842. NIEDT, De dioptricis oculi coloribus ejusque Polyopia. Dissert. Berolini.*
1845. GUÉRARD, *Institut.* No. 581. p. 64.
1846. VOLKMANN, Artikel: Sehen, in R. WAGNERS Handwörterbuch für Physiologie.
1847. CHALLIS in *Philos. Magazine.* (3) XXX. p. 366; *Transact. of the Cambridge Phil. Soc.* II.
1848. H. MEYER in HENLE u. PFEUFFER, Zeitschr. für rat. Med. V. 368.
HEINEKEN, *Philos. Magazine.* (3) XXXII. p. 318.
HAMILTON in FRORIEPS Notizen. VII. 219.
SCHNYDER, Verhandl. d. schweizer. naturf. Gesellsch. 1848. p. 15.
1849. WALLMARK, Öfvers. af Akad. förhandlingar. 1849. p. 41; POGGENDORFFS Ann. LXXXII. 129.
1850. CRANMORE in *Philos. Magaz.* (3) XXXVI. p. 485.
BAUDRIMONT, *Comptes rend. de l'Acad. d. sc.* XXXIII. 496; *Institut.* No. 931; *Philos. Magaz.* (4) II. 575.
1851. BEER, POGGENDORFFS Ann. LXXXIV. S. 518.
A. FICK, De errore optico quodam asymmetria bulbi oculi effecto. Marburg. Auszug in HENLE u. PFEUFFER, Zeitschr. für rat. Med. Neue Folge. II. S. 83.
1852. *FLIEDNER, Beobachtungen über Zerstreuungsbilder im Auge, sowie über die Theorie des Sehens. POGGENDORFFS Ann. LXXXV. 321*. 460*. LXXXVI. 336*; MOIGNO, *Cosmos.* I. 333.

[1] R. WAGNERS Handwörterbuch für Physiol. Artikel: Sehen.

1852. Trouessart, *Comptes rend. d. l'Acad. d. sc.* XXXV. p. 134—136. 398; *Archive de Genève.* XX. 305; *Institut.* 1852. p. 304.
Stellwag von Carion, Wiener Sitzungsber. VIII. 82; Denkschr. d. k. k. Akad. V. 2. S. 172; Zeitschrift d. Ärzte zu Wien. 1853. Heft 10 u. 11; Fechners Zentralblatt. 1854. 281—292.
1853. Meyer (in Leipzig), Poggendorffs Ann. LXXXIX. 429.
1854. A. Fick in Henle u. Pfeuffer, Zeitschr. N. Folge. V. 277.
Gut, Über Diplopia monophthalmica. Dissert. Zürich.

Nachtrag.

Die hierher gehörigen Formen der Abweichungen sind seit Veröffentlichung des obigen Paragraphen im ärztlichen Interesse ausführlicher studiert worden, namentlich von Donders und Knapp. Whewell hat für sie den sehr zweckmäßigen Namen des Astigmatismus vorgeschlagen (*ἀ* privativum und *στίγμα* von *στίζω*, pungo, d. h. „ohne Brennpunkt"). Er unterscheidet regulären und irregulären Astigmatismus; ersterer umfaßt die oben unter Nr. 5, Seite 163—169, beschriebenen Erscheinungen, welche davon herrühren, daß die Krümmung der brechenden Flächen des Auges, namentlich der Hornhaut in verschiedenen Meridianen verschieden ist. Der irreguläre Astigmatismus dagegen, welcher sich in den Erscheinungen der Polyopia monocularis äußert, umfaßt diejenigen Erscheinungen, welche davon herrühren, daß auch die in jeder einzelnen Meridianebene des Auges einfallenden Strahlen nicht genau in einen Brennpunkt vereinigt werden.

Der irreguläre Astigmatismus rührt in der Regel von der Kristallinse her, wie schon oben S. 164 gezeigt wurde, abgesehen von solchen Fällen, wo kegelförmige Erhebungen, Geschwüre und ähnliche Leiden der Hornhaut krankhafter Weise entstanden sind. Es zeigt sich dies auch darin, daß bei Augen ohne Linse die Polyopie ganz wegfällt und solche Augen die Erscheinungen des regulären Astigmatismus, namentlich die bald linienförmige, bald ovale Form der Zerstreuungskreise, wie sie auf Seite 166 beschrieben sind, viel regelmäßiger und deutlicher zeigen als normale Augen.

Donders hat die Erscheinungen, welche jeder einzelne Sektor der Kristalllinse hervorbringt, dadurch noch genauer untersucht, daß er einen kleinen Schirm mit sehr kleiner Öffnung vor dem Auge herumführte und so bewegte, daß das Licht bald durch den einen, bald durch den anderen Sektor der Linse fiel. Es zeigte sich dabei erstens, daß jeder einzelne Sektor der Linse die auffallenden Strahlen nahehin in einen Punkt vereinigt, daß aber die Brennpunkte der verschiedenen Sektoren nicht zusammenfallen. Zweitens ist aber auch die Vereinigung der Strahlen durch jeden einzelnen Sektor nicht ganz genau, sondern die der Augenachse näheren scheinen einen entfernteren Vereinigungspunkt zu haben als die peripherisch einfallenden Strahlen. Daher drängen sich in dem Zerstreuungskreise jedes Sektors die Strahlen gegen die Peripherie hin zusammen, ehe der Ort der engsten Vereinigung erreicht ist, und nachher drängen sie sich an der zentralen Seite des Zerstreuungskreises zusammen.

Der reguläre Astigmatismus zeigt sich in fast allen menschlichen Augen in geringem Grade. Seine Größe kann nach demselben Prinzipe, wie die Breite der Akkommodation gemessen werden. Astigmatische Augen haben, wie oben angeführt wurde, verschiedene Sehweite für Linien von verschiedener Richtung im Gesichtsfelde. Wenn die größte dieser Sehweiten P ist und bei demselben

unveränderten Akkommodationszustande die kleinste für eine andere Linienrichtung gleich p, so brauchen wir als Maß des Astigmatismus

$$As = \frac{1}{p} - \frac{1}{P}.$$

So lange As kleiner ist als $\frac{1}{40}$, bringt es noch keine erhebliche Störung des Sehens hervor; wenn es aber größer ist, wird die Gesichtsschärfe merklich beeinträchtigt, und es kann solchen Augen durch Brillengläser mit zylindrischen Flächen geholfen werden, deren Brennweite man der Größe As gleich groß wählt, und deren geradlinige Zylinderkanten man, wenn die zylindrische Krümmung konvex ist, der Richtung der entferntesten deutlich gesehenen Linien parallel macht. Ist die zylindrische Krümmung konkav, so stellt man die Zylinderkanten im Gegenteil senkrecht zu jener Richtung. Die zweite Fläche der Zylinderlinsen kann man sphärisch schleifen, so daß die gleichzeitig etwa vorhandene Myopie oder Hypermetropie korrigiert wird.

Ein System zylindrischer Linsen ist auch das beste Mittel schnell herauszufinden, ob und wie großer Astigmatismus vorhanden sei, und welches die Richtungen des Meridians größter und kleinster Sehweite sind. Astigmatische Linsen mit veränderlichem Grade von Astigmatismus kann man sich nach einem Vorschlage von Stokes zusammensetzen aus zwei gleichen Zylinderlinsen, die man aufeinander legt. Stellt man sie so, daß ihre Zylinderkanten sich rechtwinkelig schneiden, so sind sie nicht astigmatisch, sondern wirken zusammen wie eine sphärische Linse. Dreht man sie unter einem kleineren oder größeren Winkel, so kann man ihnen beliebig wachsende Größe des Astigmatismus geben.

Einen zweckmäßigen Apparat zur schnellen Messung des Astigmatismus hat E. Javal durch Herrn Nachet in Paris konstruieren lassen. Zwei Sterne von je 24 Linien werden durch Konvexlinsen mit parallelen Gesichtslinien betrachtet. Man entfernt die Zeichnungen so weit, bis nur noch eine der Linien scharf gesehen wird. Dann werden Zylinderlinsen, die in zwei drehbaren kreuzförmigen Fassungen sitzen, entweder einzeln oder zu zweien kombiniert vorgeschoben, bis man eine Stärke gefunden hat, bei der alle Linien des Sterns gleich deutlich erscheinen. Das Zentrum der beiden drehbaren Kreuze ist selbst an einem beweglichen Arme befestigt, der um die optische Achse der Konvexlinse gedreht werden kann, um der Krümmung des zylindrischen Glases die richtige Richtung geben zu können.

Die von Donders und Knapp ausgeführten Messungen der Hornhaut astigmatischer Augen haben ergeben, daß mit wenigen Ausnahmen die Hornhaut den regelmäßigen Astigmatismus bedingt, und daß er bei höheren Graden häufig ein wenig vermindert wird durch einen entgegengesetzten Astigmatismus der Kristallinse.

Die Richtung der Linien, für welche die Sehweite am größten ist, ist wie in den oben angegebenen Fällen von A. Fick und mir selbst in der Regel der vertikalen Richtung näher als der horizontalen; doch kommt auch, wie bei Th. Young, in nicht allzu seltenen Fällen das Umgekehrte vor.

1852. A. Müller, Über das Beschauen der Landschaften mit normaler und abgeänderter Augenstellung. (Angeblich von Astigmatismus herrührend.) Poggendorffs Ann. LXXXVI. 147—152. *Cosmos.* I. 336.

1852. A. BEER, Über den optischen Versuch des Herrn LIBRI. POGGENDORFFS Ann. LXXXVII. 115—120.

— J. HIPPESLEY, *Phenomena of light. Athen.* 1852. p. 1069—1070; 1368.

— R. W. H. HARDY, *Phenomena of light.* Ebenda. p. 1306.

1853. FECHNER, Über einige Verschiedenheiten des Sehens in vertikalem und horizontalem Sinne nach verschiedenen Beobachtungen. FECHNERS Zentralblatt. S. 73—85; 96—99; 374—379; 558—561.

— L. L. VALLÉE, *Théorie de l'oeil. C. R.* XXXVI. 769—773; 865—867.

— FLIEDNER, Zur Theorie des Sehens. POGGENDORFFS Ann. LXXXVIII, 29—44.

— H. MEYER, Über die sphärische Abweichung des menschlichen Auges. Ebenda. LXXXIX. 540—568.

— BEER, Über den Hof um Kerzenflammen. Ebenda. LXXXVIII. 595—597.

— POWELL, *On a peculiarity of vision. Rep. of Brit. Assoc.* 1852, 2. p. 11.

1854. J. P. DEPIGNY, (Hof um Kerzenflammen.) *Arch. des sciences phys.* XXVI. 166—172.

— J. GUT, Über Doppeltsehen mit einem Auge. HENLE und PFEUFER, Zeitschr. (2) IV. 395—400.

1855. Über den Gang der Lichtstrahlen im Auge. Verhandl. der naturforsch. Ges. in Basel. I. 269—282. *Arch. des sciences phys.* XXXII. 145—146.

— H. MEYER, Über den die Flamme eines Lichts umgebenden Hof usw. POGGENDORFFS Ann. XCVI, 235—262; 603—607; 607—609.

1856. Derselbe, Über die Strahlen, die ein leuchtender Punkt im Auge erzeugt. Ebenda. XCVII. 233—260. XCVIII, 214—242.

1857. VAN DER WILLIGEN, Eine Lichterscheinung im Auge. POGGENDORFFS Ann. CII. 175—176.

— J. TYNDALL im *Phil. Mag.* (4) XI. 332. (Ein Fall, wo Interferenzringe im Gesichtsfelde erschienen, ähnlich denen eines mit Lycopodium bepulverten Glases.)

1858 G. M. CAVALLIERI, *Sulla cagione del vedere le stelle e i punti luminosi affetti da raggi. Cimento.* VIII. 321—360.

1860. F. ZÖLLNER, Beiträge zur Kenntnis der chromatischen und monochromatischen Abweichung des menschlichen Auges. POGGENDORFFS Ann. CXI. 329—336. *Ann. de chimie.* (3) LX. 506—509.

— WHARTON JONES, *Analysis of my sight, with a view to ascertain the focal power of my eyes for horizontal and for vertical rays, and to determine whether they possess a power of adjustment for different distances. Proc. of Roy. Soc.* X. 380—385. *Phil. Mag.* (4) XX. 480—483.

1861. DONDERS, Beiträge zur Kenntnis der Refraktions- und Akkommodationsanomalien. Arch. für Ophthalm. VII, 1. S. 155—204.

1862. J. H. KNAPP, Über die Asymmetrie des Auges in seinen verschiedenen Meridianen. Arch. für Ophthalm. VIII, 2. S. 185—241.

— GIRAUD TEULON, *Causes et mécanisme de certains phénomènes de polyopie monoculaire. C. R.* LIV. 904—906; 1130—1131. *Inst.* 1862. p. 138—139; 173.

— F. C. DONDERS, Astigmatismus und zylindrische Gläser. Berlin.

1863. B. A. POPE, Beiträge zur Optik des Auges. Archiv für Ophthalm. IX, 1. S. 41—63.

— C. KUGEL, Über die Wirkung schief vor das Auge gestellter sphärischer Brillengläser beim regelmäßigen Astigmatismus. Ebenda. X, 1. S. 89—96.

— MIDDELBURG, De Zidplaats van het Astigmatisme. Utrecht.

— PH. H. KNAUTHE, Über Astigmatismus. Dissert. Leipzig.

1864. F. C. DONDERS, Der Sitz des Astigmatismus (nach MIDDELBURGS Resultaten). Archiv für Ophthalm. X, 2. S. 83—108.

— J. H. KNAPP, Über die Diagnose des irregulären Astigmatismus. Monatsbl. für Augenheilkunde. 1864. S. 304—316.

— DONDERS, *Anomalies of accommodation and refraction.* London. 1864. p. 449—556.

1865. L. KUGEL, Über die Sehschärfe bei Astigmatikern. Archiv für Ophthalm. XI, 1. S. 106—113.

— H. KAISER, Zur Theorie des Astigmatismus. Ebenda. XI, 3. S. 186—229.

— X. GALEZOWSKI, *Étude sur la diplopie monophthalmique. Ann. d'oculistique.* LIV. p. 199—208.

1866. E. JAVAL, *Sur le choix des verres cylindriques. Ann. d'oculist.* LV. p. 5—29.

— Derselbe, *Histoire et bibliographie de l'astigmatisme.* Ebenda. LV. p. 105—127.

§ 15. Die entoptischen Erscheinungen.

Das in das Auge einfallende Licht macht unter gewissen Bedingungen eine Reihe von Gegenständen sichtbar, welche sich im Auge selbst befinden. Solche Wahrnehmungen nennt man entoptische. Unter gewöhnlichen Umständen werfen kleine dunkle Körper, die im Glaskörper oder der Linse und wässrigen Feuchtigkeit schweben, keinen sichtbaren Schatten, und werden deshalb nicht bemerkt. Der Grund davon ist, daß durch jeden Teil der Pupille meist gleichmäßig Licht eindringt, und somit für die Beleuchtung der hinteren Augenkammer die ganze Pupille gleichsam die leuchtende Fläche bildet. Es ist aber bekannt, daß, wenn Licht von einer sehr breiten Fläche ausgeht, nur breite Gegenstände, oder solche Gegenstände, welche der den Schatten auffangenden Fläche sehr nahe sind, einen sichtbaren Schatten werfen.

Nun gibt es im Auge allerdings Gegenstände, nämlich die Gefäße der Netzhaut, welche sehr nahe vor der lichtempfindenden Fläche des Auges sich befinden, und daher immer einen Schatten auf die dahinter liegenden Teile der Netzhaut werfen. Aber eben weil diese Teile der Netzhaut hinter den Gefäßen immer beschattet sind, und der beschattete Zustand für sie der normale ist, nehmen sie ihn nur unter besonderen Umständen wahr, welche wir weiter unten näher besprechen wollen.

Zunächst wende ich mich zu den in den durchsichtigen Mitteln des Auges enthaltenen kleinen schattengebenden Körpern. Um sie wahrzunehmen, muß man Licht von einer sehr kleinen leuchtenden Stelle, welche sich sehr nahe vor dem Auge befindet, in das Auge fallen lassen. Zu dem Zwecke kann man entweder das im Focus einer kleinen Sammellinse entworfene Bild einer fernen Lichtflamme nahe vor das Auge bringen, oder ein kleines gut poliertes metallisches Knöpfchen, welches von der Sonne oder einer Lampe beschienen wird, oder einen Schirm von dunklem Papier, welcher Licht durch eine sehr kleine Öffnung einfallen läßt. Am zweckmäßigsten ist es, eine Sammellinse von großer Apertur und kleiner Brennweite *a* Fig. 77 aufzustellen; vor ihr in einiger Entfernung eine Lichtflamme *b*, von der die Linse in ihrem Brennpunkte ein verkleinertes Bild entwirft. Dann stellt man hier einen undurchsichtigen dunklen Schirm *c* mit kleiner Öffnung so auf, daß das Bild der Flamme auf diese Öffnung fällt. Durch die Öffnung dringt dann ein breiter Kegel divergierender Strahlen. Ein Auge *o*, welches der Öffnung sehr genähert wird, erblickt durch sie hindurch die breite, gleichmäßig erleuchtete Fläche der Linse, auf welcher sich nun mit großer Deutlichkeit die entoptisch wahrzunehmenden Gegenstände darstellen. Wenn wie in Fig. 78 der leuchtende Punkt *a* zwischen dem Auge und seinem vorderen Brennpunkte *f* liegt, entwerfen die Augenmedien ein ent-

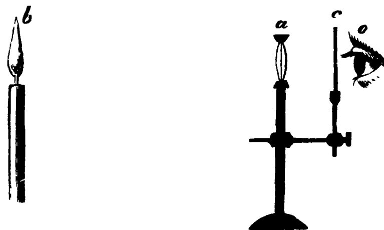


Fig. 77.

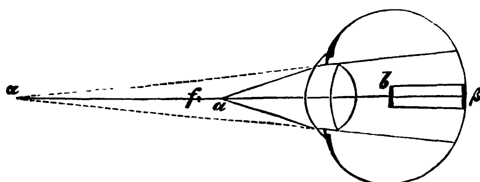


Fig. 78.

fernteres, vor dem Auge liegendes Bild α von a, und die Strahlen durchdringen den Glaskörper in Richtungen, welche von α aus divergieren. Unter diesen Umständen wird von einem im Glaskörper befindlichen dunklen Körper b ein Schatten β auf der Netzhaut entworfen, welcher größer ist als b.

Wenn wie in Fig. 79 der leuchtende Punkt a im vorderen Brennpunkte des Auges liegt, werden die von a ausgegangenen Strahlen im Glaskörper parallel sein, und von einem im Glaskörper befindlichen dunklen Körperchen b wird ein Schatten β von gleicher Größe entworfen. Liegt endlich der leuchtende Punkt vom Auge weiter entfernt als der vordere Brennpunkt des Auges f, wie in Fig. 80, so fällt das Bild von a hinter das Auge nach α, und die Strahlen konvergieren im Glaskörper nach α hin. Der Schatten β von b ist dann kleiner als b.

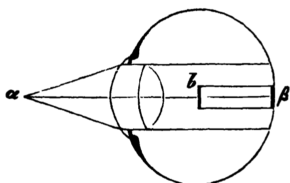


Fig. 79.

Dementsprechend bemerkt man, daß die entoptisch sichtbar gewordenen Gegenstände sich scheinbar vergrößern, wenn man das Auge dem leuchtenden Punkte nähert; sich verkleinern, wenn man es von ihm entfernt.

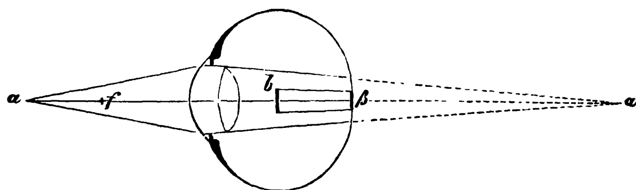


Fig. 80.

Die bei diesen Versuchen beleuchtete Stelle der Netzhaut ist der Zerstreuungskreis des leuchtenden Punktes. Auf diesem werden die Schatten der entoptisch wahrgenommenen Gegenstände entworfen. Diese Schatten sind zwar scharf genug, daß man die Gestalt der Objekte ziemlich gut erkennen kann, wenn die Lichtquelle klein genug ist, aber sie bilden doch niemals ganz vollkommen scharfe Bilder, weil das Licht in Wirklichkeit doch nicht von einem einzigen Punkte, sondern stets von einer, wenn auch kleinen, leuchtenden Fläche kommt. Das von den Augenmedien entworfene Bild dieser Fläche ist für die auf der Netzhaut zu entwerfenden Schatten die Lichtquelle, welche natürlich stets einige Ausdehnung haben wird. Während punktförmige Lichtquellen scharf gezeichnete Schatten entwerfen würden, entwerfen ausgedehntere Lichtquellen Schatten, deren Umrisse allmählich durch Halbschatten in die helle Fläche übergehen, und die deshalb minder scharf gezeichnet sind. Im allgemeinen werden deshalb die entoptischen Wahrnehmungen desto schärfer gezeichnet, je feiner die Öffnung ist, durch welche das Licht dringt, und außerdem je näher der schattengebende Körper der Netzhaut sich befindet. Aber natürlich muß man bei engeren Öffnungen auch intensiveres Licht zur Beleuchtung benutzen. Außerdem kommt bei sehr engen Öffnungen noch eine andere Erscheinung zum Vorschein, welche die Deutlichkeit der Zeichnung beeinträchtigt. Es bilden sich nämlich durch die Diffraktion am Rande des schattengebenden Körpers Diffraktionsfransen, helle und dunkle Linien, welche dem Umrisse des Schattens folgen. Dergleichen Diffraktionsfransen entstehen überall, wo punktförmige, hinreichend intensive Lichtquellen Schatten werfen. Bei den gewöhnlichen Lichtquellen von größerer Breite verschwinden diese Fransen im Halbschatten.

Wenn das Auge oder der leuchtende Punkt seine Stellung verändert, so verschieben sich die Schatten der Körper, welche verschieden weit von der Netzhaut abstehen, in verschiedener Weise, und nehmen dadurch eine verschiedene gegenseitige Lage an. Man kann, wie LISTING gezeigt hat, diesen Umstand benutzen, um den Ort im Auge ungefähr zu bestimmen, wo sich die schattengebenden Körperchen befinden. Das entoptische Gesichtsfeld ist begrenzt durch den kreisförmigen Schatten der Iris. Wenn wir nacheinander verschiedene Punkte des kreisförmigen Feldes fixieren, verschieben sich die Schatten aller Körper, welche nicht in der Ebene der Pupille liegen, gegen die kreisförmige Begrenzung des Gesichtsfeldes. Diese Bewegung der Schatten in dem entoptischen Gesichtsfelde nennt LISTING die relative entoptische Parallaxe; er nennt sie positiv, wenn die Bewegung des betreffenden Schattens die gleiche Richtung hat mit der Richtung des Visierpunktes, negativ, wenn sie entgegengesetzte Richtung hat. Die relative entoptische Parallaxe ist Null für Objekte, welche in der Ebene der Pupille liegen, positiv für Objekte hinter der Pupille, negativ für Objekte vor der Pupille. Für Objekte, welche der Netzhaut sehr nahe liegen, ist die Verschiebung der Schatten fast ebenso groß wie die des Visierpunktes, so daß diese den Visierpunkt bei seinen Bewegungen überall hin begleiten, wenn sie nicht durch wirkliche Bewegungen in der Flüssigkeit des Glaskörpers aus der Gesichtslinie entfernt werden.

Der Schatten auf der Netzhaut ist ebenso gerichtet wie der schattenwerfende Körper; da aber, was auf der Netzhaut oben ist, im Gesichtsfelde unten erscheint, so erscheinen die entoptisch gesehenen Gegenstände im Gesichtsfelde stets verkehrt.

Was man entoptisch wahrnehmen kann, ist folgendes:

1. Begrenzt ist das helle Feld durch den Schatten der Iris; es ist deshalb nahe kreisrund, entsprechend der Form der Pupille. Hat der Pupillarrand der Iris Einschnitte, Falten oder Vorsprünge, wie dies in vielen Augen der Fall ist, so sind dergleichen auch in dem entoptischen Bilde zu erkennen. Auch die Erweiterung und Verengerung der Pupille kann man entoptisch beobachten, am leichtesten, wenn man das andere Auge abwechselnd mit der Hand verdeckt und wieder frei läßt. Sobald Licht in dieses Auge fällt, verengern sich die Pupillen beider Augen, und man erkennt diese Verengerung leicht im entoptischen Bilde.

2. Von den Flüssigkeiten herrührend, welche die Hornhaut überziehen (Tränenfeuchtigkeit, Sekret der Augenliderdrüsen), nimmt man oft im entoptischen Gesichtsfelde Streifen wahr, wolkig-helle oder lichtere Stellen, tropfenähnliche Kreise mit heller Mitte, welche durch Blinzen mit den Augenlidern schnell verwischt und verändert werden. Dergleichen sind dargestellt in Fig. 81. Sie sind meist in schnellem Zerfließen begriffen und haben eine selbständige Bewegung von oben nach unten. Die Streifen sind am stärksten ausgeprägt dicht am Rande der Augenlider, wenn man die Lider vor die Pupille treten läßt, und sind der Ausdruck der kapillaren konkaven Flüssigkeitsschicht, welche sich von der Hornhaut auf den Rand der Augenlider herüberzieht. Die Tropfen entstehen wohl durch kapilläre Anhäufungen der feuchten Schicht um Schleimklümpchen, Staubteile u. dgl. Die helle Stelle in der Mitte der Tropfen bildet oft ein unvollkommenes optisches Bild von der Lichtquelle, ist z. B. dreieckig, wenn das Licht durch eine dreieckige Öffnung in das Auge fällt. Dies Bild

der Lichtquelle steht scheinbar aufrecht im entoptischen Gesichtsfelde, während es auf der Netzhaut verkehrt sein muß. Die Ansammlungen von Flüssigkeit auf der Hornhaut bilden hierbei kleine Konvexlinsen, welche hinter sich ein umgekehrtes Bild der vor ihnen liegenden Gegenstände entwerfen. Der Bewegung dieser Gebilde im Gesichtsfelde von oben nach unten entspricht eine wirkliche Bewegung nach oben, welche wohl dadurch bedingt wird, daß das obere Augenlid, während es gehoben wird, die zähen Schleimteile nachzieht.



Fig. 81.

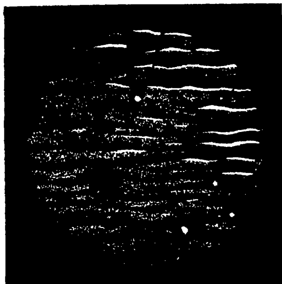


Fig. 82.

3. Die kraus gewordene Vorderfläche der Hornhaut, nachdem man eine Zeitlang das geschlossene Auge mit den Fingern gedrückt oder gerieben hat. Man sieht ziemlich gleichförmig verteilt größere, unbestimmt begrenzte, wellige oder netzartig geordnete Linien und getigerte Flecken, die sich eine Viertelstunde bis zu einigen Stunden halten. Es sind dergleichen dargestellt in Fig. 82. Zuweilen bleiben auch in dem Netze dieser Linien einzelne unveränderte glatte Stellen stehen, welche darauf schließen lassen, daß hier die Hornhaut eine andere Art der Konsistenz habe.

Außerdem finden sich, von der Hornhaut herrührend, zuweilen konstante dunkle Flecken und Linien vor, welche sich nicht ändern und wohl meist Reste von Entzündungen und Verletzungen sind.

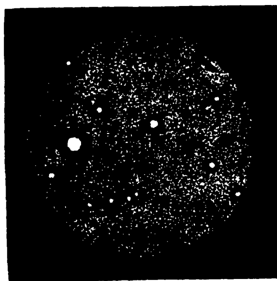


Fig. 83.

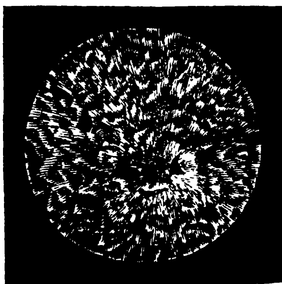


Fig. 84.

4. Von der Linse, namentlich der vorderen Kapselwand, und dem vorderen Teile des Kristallkörpers rühren mannigfache Erscheinungen her. Listing beschreibt folgende vier Formen:

a) Perlflecken, runde oder rundliche Scheibchen, innen hell, mit scharfem, dunklem Rande. Sie sehen bald Luftbläschen, bald Öltropfen, bald Kristallchen ähnlich, welche man durch das Mikroskop sieht (s. Fig. 83); Listing hält sie für Schleimmassen in der Morgagnischen Feuchtigkeit.

b) Dunkle Flecken; unterscheiden sich von den vorigen durch den Mangel eines hellen Kerns und auch durch größere Mannigfaltigkeit der Gestalt. Sie scheinen partielle Verdunkelungen der Kapsel oder Linse zu sein (s. Fig. 84).

c) Helle Streifen, meist einen unregelmäßigen Stern mit wenig Ausläufern in der Mitte des Gesichtsfeldes darstellend (Fig. 85). Listing hält sie für das Bild eines nabelförmigen Gebildes mit naht- oder wulstähnlichen

Zweigen in der vorderen Kapselmembran, herrührend von der im Fötalzustande erfolgenden Trennung dieses Kapselteils von der Innenseite der Hornhaut.

d) Dunkle radiale Linien (Fig. 86), welche wohl Andeutungen des strahligen Baues der Linse sind.

Einzelne von den genannten Formen scheinen fast in jedem Auge sichtbar zu sein, wenige Augen sind ganz frei davon.

5. Bewegliche Gebilde im Glaskörper, die sogenannten fliegenden Mücken (*Mouches volantes*), welche teils als Perlschnüre, teils als vereinzelte oder zusammengruppierte Kreise mit hellem Zentrum, teils als unregelmäßige Gruppen sehr feiner Kügelchen, teils als blasse Streifen, ähnlich den Falten einer sehr durchsichtigen Membran, erscheinen. Da viele von ihnen sehr nahe vor der Netzhaut sich befinden, sieht man sie oft ohne weitere Hilfsmittel, indem man nach einer breiten, gleichmäßig erleuchteten Fläche, z. B. dem hellen Himmel, blickt. Daß sie sich nicht bloß scheinbar, sondern wirklich bewegen, bemerkt man leicht, wenn man bei aufrechter Haltung des Kopfes, z. B. durch eine Fensterscheibe, nach dem Himmel blickt, und einen mit einem Merkzeichen versehenen Punkt des Glases fixiert. Dann sieht man die entoptischen Erscheinungen meistens langsam im Gesichtsfelde herabsinken. Senkt man den Blick und hebt ihn wieder, so folgen die Mücken dieser Bewegung des Visierpunktes, schießen aber gewöhnlich etwas über das Ziel hinaus und sinken dann wieder. Nach einer Bewegung des Auges dagegen, welche von oben nach unten gerichtet ist, tritt ein solches Schwanken über das Ziel hinaus nicht ein, auch nicht bei seitlichen Bewegungen. Beobachtet man dagegen bei senkrecht nach unten oder oben gerichteter Gesichtslinie, so liegen die Mücken ziemlich ruhig. Sehr leicht läßt man sich aber bei diesen Beobachtungen verleiten, den Blick nach einer solchen dem Gesichtspunkt naheliegenden Mücke richten zu wollen, um sie durch direkte Fixation deutlicher zu sehen. Dann fliegt die entoptische Erscheinung vor dem Visierpunkte einher, ohne natürlich je von ihm erreicht werden zu können. Gerade auf diese Eigentümlichkeit der Erscheinung bezieht sich wohl der Name der *Mouches volantes.* Man verwechsle diese scheinbare Bewegung nicht mit einer wirklichen, und achte bei den Beobachtungen der letzteren darauf, einen äußeren Gesichtspunkt ganz fest zu fixieren.

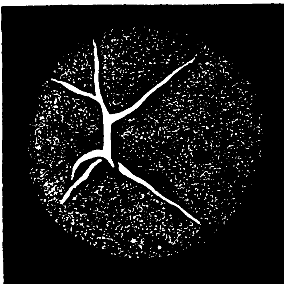


Fig. 85.

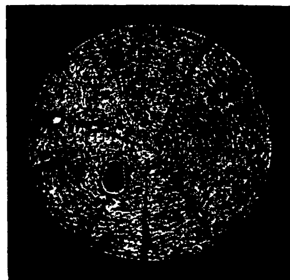


Fig. 86.

Um solche bewegliche Objekte mit Ruhe betrachten zu können, wählt man am besten eine Lage des Kopfes, wo das Auge vertikal nach unten oder nach oben sieht, weil dann die Bewegungen der schwimmenden Körperchen aufhören. Übrigens kann man Mücken, welche seitlich im Gesichtsfelde liegen, zwingen, nach der Stelle des deutlichsten Sehens heranzuschwimmen, wenn man das Auge erst recht schnell in der Richtung bewegt, nach welcher sie vom Visierpunkt aus liegen, und dann langsam zurückbewegt.

DONDERS und DONCAN[1] unterscheiden folgende Formen dieser Objekte:

a) Größere isolierte Kreise, bald mit dunkleren, bald mit blasseren Umrissen, in der Mitte heller, meist noch mit einem schmalen Lichtkreis umgeben. Sie haben zwischen $^1/_{28}$ und $^1/_{120}$ mm Durchmesser, und sind $^1/_3$ bis 3 oder 4 mm von der Netzhaut entfernt, kommen aber auch in der Nähe der Linse vor. Ist das Auge lange ruhig gewesen, so zeigen sich nur wenige; sie kommen namentlich, und zwar scheinbar von unten her, zum Vorschein durch eine schnelle Bewegung des Auges von unten nach oben, der plötzlicher Stillstand folgt, und senken sich dann wieder langsam nach unten. Ihre Bewegung kann für die dunkelsten in einer Ausdehnung von $1^1/_2$ mm direkt beobachtet werden, und ist wahrscheinlich viel ausgedehnter. Ihre seitlichen Bewegungen bei seitlichen Bewegungen des Auges findet DONCAN beschränkt. In meinen eigenen Augen kann ich einen solchen Unterschied nicht wahrnehmen. Wenn ich den Kopf auf die Seite lege, so finde ich, daß die Mücken jetzt ebenso schnell und weit scheinbar nach dem Erdboden zu sinken, in Wirklichkeit nach dem aufwärts gewendeten Augenwinkel emporsteigen, wie bei aufrechter Haltung des Kopfes. Bei der letzteren Haltung erscheinen die seitlichen Bewegungen der Mücken allerdings beschränkter als die absteigenden, weil sie seitlich eben nur die Bewegungen des Visierpunktes mitmachen. Eine Bewegung derselben parallel der Gesichtslinie gelang nicht zu konstatieren. Viele, obgleich scheinbar voneinander getrennt, scheinen sich immer in gleichem Abstande zu begleiten. oder bleiben in derselben Beziehung zu anderen Formen, so daß man berechtigt ist, auf einen unsichtbaren Zusammenhang zu schließen. Ihnen entsprechend fand DONCAN bei mikroskopischer Untersuchung des freigelegten und unverletzten Glaskörpers von seiner Oberfläche aus darin blasse Zellen, welche in der Verwandlung in Schleimstoff begriffen zu sein schienen, wie in Fig. 87 abgebildet sind.



Fig. 87.

b) Perlschnüre kommen in den meisten Augen vor; DONCAN konnte jedoch keine sehen. Ihre Breite beträgt $^1/_{33}$ bis $^1/_{190}$ mm, ihre Länge 1 bis 4 mm. Die schmalsten liegen gewöhnlich dichter bei, die breiteren und dunkleren entfernter von der Netzhaut, in $^1/_4$ bis 3 mm Abstand. Ihre Bewegungsart ist meist dieselbe wie der vorher beschriebenen Kreise, doch sind sie zuweilen auch befestigt. Einzelne sind isoliert, andere hängen mit anderen Gebilden zusammen. Sie entsprechen Fasern, die mit Körnern besetzt sind (Fig. 88), welche durch das Mikroskop im Glaskörper gefunden werden.


Fig. 88.

c) Die zusammenhängenden Gruppen von größeren und kleineren, teils blassen, teils dunklen Kreisen, welche den mikroskopisch gefundenen Körnerhaufen (Fig. 89) entsprechen, sind meist undurchscheinender als die übrigen Formen, weil mehrere Körner in der Richtung der Gesichtsachse hintereinander liegen. Diese sind es, die am häufigsten beim gewöhnlichen Sehen als *Mouches volantes*

[1] ANDREAS DONCAN, Dissert. de corporis vitrei struct. Trajecti ad Rhenum 1854. — Onderzoekingen gedaan in het physiologisch Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. 171.

wahrgenommen werden Nicht selten scheinen einige von ihnen in der Nähe der Gesichtslinie einen Gleichgewichtszustand einzunehmen; aber sie kommen doch auch bei Bewegungen des Auges auf gleiche Weise und in gleicher Richtung, mit denselben Bewegungen wie die Perlschnüre, in größerer Menge zum Vorschein, um das Gesichtsfeld in der Folge wieder zu verlassen.


Fig. 89.


Fig. 90.

d) Die Falten zeigen sich in Gestalt hellerer Bänder, von zwei dunkleren, nicht scharf gezeichneten Linien begrenzt. DONCAN unterscheidet davon noch wieder zwei Formen. Einige zeigen sich nämlich entweder ähnlich einer stark gefalteten Faser, oder wie verschiedene kleine Bänder, einander sehr nahe, auf unsichtbare Weise miteinander verbunden, oder als ein unregelmäßig aufgerolltes, in den verschiedensten Richtungen gefaltetes Häutchen, das seine Form konstant behält, wie das nach einer mikroskopischen Beobachtung in Fig. 90 dargestellte. Diese bewegen sich wie die Perlschnüre und liegen nur $2^1/_2$ bis 4 mm von der Netzhaut entfernt. Davon unterscheiden sich sehr ausgebreitete Häute, die teils dicht hinter der Linse liegen, teils nur 2 bis 4 mm von der Netzhaut entfernt, während zwischen 4 und 10 mm Entfernung von der Netzhaut keine getroffen werden. In den ersteren zeigen sich Falten von nicht weniger als $^1/_{23}$ mm Breite, in den letzteren haben sie selten mehr als $^1/_{60}$ mm. Sie kommen zum Vorschein, wenn die Gesichtslinie seitwärts bewegt wird, aber namentlich auch durch eine kräftige, plötzlich abgebrochene Bewegung von oben nach unten. Scheinbar steigen hierbei die dicht hinter der Linse gelegenen Falten nach oben, während umgekehrt die in der Nähe der Netzhaut gelegenen nach unten sinken, so daß sie sich in der Gesichtslinie aneinander vorbei schieben. Meist sieht man nun die gefalteten Häute mehr und mehr undeutlich werden, ohne daß sie doch aus dem Gesichtsfelde sich entfernten, und doch kommen sie durch Wiederholung der Bewegung aufs neue deutlicher zum Vorschein. DONCAN schließt daraus, daß diese Häute nur scheinbar eine so ausgebreitete Bewegung haben, und daß nicht die Häute sich fortbewegen, sondern nur Faltungen sich fortpflanzen, welche sich bei der plötzlich unterbrochenen Bewegung des Auges an der Peripherie formen und sich bis an das andere Ende der Häute ausstrecken, wobei sie ihre Schärfe verlieren und minder sichtbar werden. Die Ursache der verschiedenen Richtung, worin die Bewegung dieser Häute und die Fortpflanzung der Falten stattfindet, ist darin zu suchen, daß die einen vor, die anderen hinter dem Drehpunkte des Auges liegen. Wenn man die Pupille durch Atropin erweitert, oder den leuchtenden Punkt sehr nahe an das Auge bringt, so daß man ziemlich weit zur Seite der Gesichtslinie sehen kann, so bemerkt man, daß namentlich bei kräftigen, plötzlich unterbrochenen seitlichen Bewegungen des Auges noch mehr Häute dicht hinter der Linse zum Vorschein kommen, die selten bis an die Gesichtslinie reichen, und mit einem unregelmäßigen, zuweilen zerfetzten Rande hier endigen.

Die Bewegungsart der frei beweglichen Objekte des Glaskörpers läßt wohl kaum einen Zweifel, daß sie kleine Körper sind, welche in einem vollkommen

flüssigen Medium schwimmen und spezifisch leichter sind als die Flüssigkeit. Da man sie oft durch das ganze entoptische Gesichtsfeld schwimmen sieht, und sie in meinem Auge wenigstens das Gesichtsfeld ebensogut von oben nach unten wie von rechts nach links durchschwimmen, dieses aber bei divergierend einfallendem Lichte einen größeren Teil der Netzhaut umfaßt, als die Pupille beträgt, so muß das Bassin, in welchem sie sich bewegen, längs der Netzhaut gemessen, jedenfalls größer sein als die Pupille. Dagegen scheinen die schwimmenden Körper sich nicht von der Netzhaut entfernen zu können, denn auch bei aufwärts gerichteter Gesichtslinie, wo die Objekte wegen ihrer spezifischen Leichtigkeit streben müssen nach der Linsenseite des Glaskörpers hin zu schwimmen, sieht man dieselben Objekte sich längs der Netzhaut hin bewegen, aber nicht von ihr fort. Das Hindernis mögen wohl die Membranen sein, deren Falten man im entoptischen Gesichtsfelde sieht und welche der Netzhaut parallel zu sein scheinen. Einige solche Körperchen scheinen auch an der Glashaut befestigt zu sein, wie denn Donders mitteilt, daß er in der Gesichtslinie seines linken Auges eines vorfinde, welches dort seinen Gleichgewichtsstand habe, und von dort wohl sich senken (scheinbar steigen), aber nicht wirklich steigen könne, so daß es von unten her durch eine fadenähnliche Verbindung mit der Glashaut festgehalten zu werden scheint.

Übrigens lernt man nach einer Reihe entoptischer Beobachtungen die Gebilde des eigenen Auges einzeln kennen, und bemerkt dann, daß immer dieselbe Reihe von Formen wiederkehrt, welche sich nach Donders' Beobachtungen viele Jahre unverändert erhalten. Aus der mikroskopischen Untersuchung des Glaskörpers scheint hervorzugehen, daß diese Gebilde Reste des embryonalen Baues des Glaskörpers sind. Bei Embryonen besteht er aus Zellen, welche nachher meistens in Schleim zerfließen, während ein Teil von ihren Membranen und Kernen, oder den Fasern, zu denen sie ausgewachsen sind, bestehen bleibt. Welches übrigens der Bau des Glaskörpers bei erwachsenen Menschen sei, ist noch durchaus nicht sicher zu bestimmen.

Wir kommen jetzt zur Wahrnehmung der Netzhautgefäße, für welche aber etwas andere Verfahrungsweisen notwendig sind, als für die Wahrnehmung der bisher beschriebenen entoptischen Objekte. Das Gemeinsame dieser Methoden besteht darin, daß die Lage oder Breite des Schattens, den die Netzhautgefäße auf die hintere Fläche der Netzhaut werfen, eine ungewöhnliche wird, und daß außerdem eine stete Bewegung dieses Schattens unterhalten wird. Man kann die Netzhautgefäße nach folgenden drei Hauptmethoden wahrnehmen:

1. Man konzentriere starkes Licht, am besten Sonnenlicht, durch eine Sammellinse von kurzer Brennweite auf einen Punkt der äußeren Fläche der Sclerotica möglichst entfernt von der Hornhaut, so daß ein kleines, aber sehr lichtstarkes Bildchen der Lichtquelle auf der Sclerotica entworfen wird.* Wenn dabei das Auge auf ein dunkles Gesichtsfeld blickt, wird dieses ihm jetzt rotgelb erleuchtet scheinen und darin ein Netz baumförmig verästelter dunkler Gefäße erscheinen, entsprechend den in Fig. 91 nach einem Injektionspräparat abgebildeten Netzhautgefäßen. Wenn der Brennpunkt auf der Sclerotica hin und her bewegt wird, bewegt sich auch der Gefäßbaum hin und her, und zwar bewegen sich beide gleichzeitig nach oben, oder beide gleichzeitig nach unten,

* Dieser Versuch wird am besten mit einer der nunmehr in der ophthalmologischen Praxis angewendeten Durchleuchtungslampen angestellt. G.

oder beide nach rechts oder links. Bei solchen Bewegungen ist der Gefäßbaum deutlicher zu sehen, als wenn man längere Zeit den Brennpunkt der Linse auf einer Stelle beharren läßt; ja im letzteren Falle verschwindet er zuletzt ganz. Doch ist bei der jetzt beschriebenen Methode der Beobachtung anhaltende Bewegung weniger nötig als bei den anderen Methoden. Je kleiner übrigens der helle Fleck auf der Sclerotica ist, desto schärfer sind auch die kleineren Zweige der Gefäßverästelung ausgeprägt, so daß man bei richtiger Ausführung des Versuchs das feinste Kapillargefäßnetz zur Anschauung bringen kann. In der Mitte des Gesichtsfeldes, dem Fixationspunkte entsprechend, findet sich eine gefäßlose Stelle, gegen welche verschiedene größere Äste hinlaufen, deren Kapillaɹgefäße einen Ring mit langgezogenen Maschen um die genannteStelle bilden. Die Stelle selbst hat in H. Müllers, sowie in meinen beiden Augen ein eigentümliches Aussehen, wodurch sie sich von dem übrigen Grunde des Auges unterscheidet. Der letztere ist gleichmäßig erleuchtet, mit Ausnahme der dunklen Gefäßfigur, die Stelle des direkten Sehens hat einen stärkeren Glanz und sieht dabei wie chagriniertes Leder aus. Zu bemerken ist übrigens noch, daß, wenn man während der Beobachtung dieser Stelle einen äußeren Gegenstand fest fixiert und nun den Brennpunkt der Linse auf der Sclerotica nach oben bewegt, der Gefäßbaum, wie vorher erwähnt ist, sich ebenfalls nach oben bewegt, der chagrinierte Glanz sich dagegen ein wenig in entgegengesetzter Richtung nach unten gegen den Fixationspunkt des Auges verschiebt. Meissner hat diese Stelle ebenfalls bei dieser Beobachtungsmethode heller gesehen, schreibt ihr aber einen dunklen halbmondförmigen Schatten am Rande zu, ähnlich wie er bei der zweiten Beobachtungsmethode sichtbar wird. Einen solchen sehe ich nicht, wenn das Licht durch die Sclerotica einfällt.

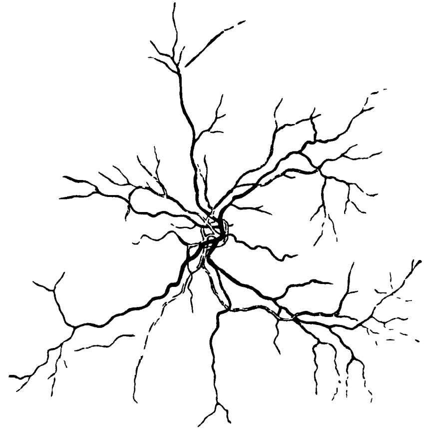


Fig. 91.

Bei diesem Versuche dringt das Licht durch die Sehnen- und Aderhaut in das Auge. Die erstere ist durchscheinend, die letztere im hinteren Teile des Auges nicht so stark pigmentiert, daß sie alles Licht abhalten könnte. Vorn auf den Ciliarfortsätzen ist die Pigmentschicht stärker, daher auch bei unserem Versuche die Erleuchtung der Netzhaut ziemlich schwach ausfällt, wenn man den Brennpunkt auf den vorderen Teil der Sclerotica nahe der Hornhaut fallen läßt. Die erleuchtete Stelle der Augenhäute bildet nun die Lichtquelle für das Innere des Auges; von ihr gehen nach allen Seiten hin gleichmäßig Strahlen aus, da das Licht in der nur durchscheinenden Sehnenhaut nicht regelmäßig gebrochen, sondern nach allen möglichen Richtungen zerstreut wird.

Während gewöhnlich das Licht nur von der Pupille her auf die Netzhaut fällt, kommt es jetzt von einem weit seitlich gelegenen Punkte und wirft deshalb die Schatten der in den vorderen Schichten der Netzhaut gelegenen Gefäße auf ganz andere Teile der hinteren Netzhautfläche als sonst.

Daß der Gefäßbaum sich scheinbar in gleichem Sinne wie der Brennpunkt der Linse bewegen muß, ist aus Fig. 92 deutlich. Es sei *v* der Durchschnitt eines Netzhautgefäßes, *k* der Knotenpunkt des Auges. Wenn der Brennpunkt des einfallenden Lichts bei *a* auf der Sclerotica liegt, fällt der Schatten des Gefäßes nach α, das Auge projiziert demgemäß einen dunklen Streifen in der Richtung αA im Gesichtsfelde. Liegt der Brennpunkt in *b*, so fällt der Schatten nach β, und es wird der dunkle Streifen in das Gesichtsfeld nach *B* verlegt. Während sich also die Lichtquelle von *a* nach *b* bewegt, wird der scheinbare Gefäßstamm im Gesichtsfelde von *A* nach *B* in gleicher Richtung wandern. Die chagrinierte Fläche um den Visierpunkt herum zeigt die entgegengesetzte Bewegungsart; sie entsteht also jedenfalls nicht in derselben Weise, wie die Gefäßschatten entstehen, doch ist bisher der Bau des gelben Flecks noch zu wenig bekannt, als daß wir den Grund dieser Erscheinung anzugeben wüßten. Im Gesichtsfelde greift auf der dem Lichte abgekehrten Seite der Gefäßbaum etwas über den Rand der chagrinierten Stelle, oben und unten scheint er den Rand nur zu berühren, dem Lichte zugekehrt ist ein Zwischenraum zwischen beiden, gleichviel ob das Licht vom inneren oder äußeren Augenwinkel einfällt. Es ist dies wohl dadurch bedingt, daß die Gefäßverzweigungen mehr nach vorn liegen als die Schicht, welche durch Brechung oder Zurückwerfung des Lichts das chagrinierte Aussehen erzeugt, und daher bei schief einfallendem Lichte der Schatten der Gefäßfigur auf der Hinterfläche der Netzhaut nicht senkrecht unter den Gefäßen liegt. Diejenige Struktur, welche das chagrinierte Ansehen hervorruft, scheint demnach ziemlich genau dieselbe Ausdehnung zu haben, wie die gefäßlose Stelle der Netzhaut.

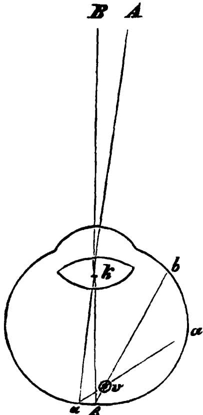


Fig. 92.

2. Die zweite Methode zur Beobachtung der Netzhautgefäße ist folgende: Man blicke auf einen dunklen Hintergrund hin und bewege dabei unterhalb oder seitlich vom Auge ein brennendes Licht hin und her. Man sieht dann bald den dunklen Hintergrund von einem matten weißlichen Scheine überzogen. in welchem sich der dunkle Gefäßbaum abzeichnet. Die Figur bleibt nur so lange deutlich, als man das Licht bewegt. Wenn man das Licht nur von rechts nach links bewegt, erscheinen hauptsächlich die von oben nach unten verlaufenden Gefäße, wenn man es von oben nach unten bewegt, die horizontal verlaufenden. Bei den Bewegungen des Lichts bewegt sich gleichzeitig der ganze Gefäßbaum, aber nicht in allen seinen Teilen gleichmäßig. Meissner vergleicht sehr passend die Art der Bewegung des Gefäßbaums hierbei mit dem Ansehen eines vom Wasser entworfenen Spiegelbildes, wenn Wellen darüber fortlaufen. Bei näherer Untersuchung der Erscheinung zeigt sich, daß, wenn abwechselnd das Licht gegen die Gesichtslinie hin und von ihr weg bewegt wird, der Gefäßbaum im Gesichtsfelde sich in gleicher Richtung wie das Licht verschiebt. Wenn aber das Licht in Richtung eines Kreisbogens bewegt wird, dessen Mittelpunkt in der Gesichtslinie liegt, verschiebt sich der Gefäßbaum in entgegengesetzter Richtung. Wird also z. B. das Licht unter dem Auge gehalten und vertikal nach oben und unten bewegt, so bewegt sich auch der Gefäßbaum im Gesichtsfelde mit dem Lichte zugleich nach oben und nach unten; wird es horizontal

unter dem Auge von rechts nach links bewegt, so geht der Gefäßbaum nach rechts, wenn das Licht nach links, und umgekehrt.

Die inneren Äste des Gefäßbaums erscheinen nicht in so großer Feinheit der Zeichnung wie bei den beiden anderen Methoden.

In der Mitte, dem Visierpunkte entsprechend, beschreiben mehrere Beobachter eine helle kreisförmige oder elliptische Scheibe. Fig. 93 ist die Abbildung, welche Burow davon gegeben hat. Sie ist an dem der Flamme zugewendeten Rande durch einen dunklen halbmondförmigen Schatten gesäumt, in der Mitte am hellsten. H. Müller sieht diese Scheibe gar nicht, und ich selbst sehe immer nur den halbmondförmigen Schatten, welcher die dem Lichte zugekehrte Seite ihrer Peripherie bildet, während die andere Seite keine entschiedene Begrenzung darbietet. Auch diese zentrale Scheibe bewegt sich bei Bewegungen des Lichts. Man überzeugt sich davon, wenn man, während man die Erscheinung wahrnimmt, einen äußeren Punkt fixiert. Bei mir liegt der Fixationspunkt immer an dem dem Lichte zugewendeten Teile des Randes der hellen Scheibe, wenn ich den halbmondförmigen Schatten meines Auges zur Scheibe ergänzt denke.

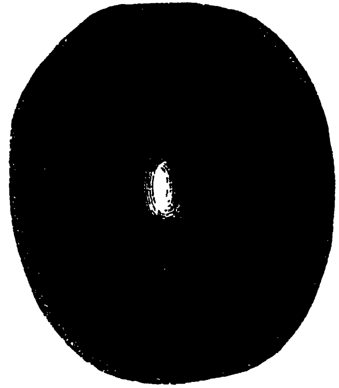


Fig. 93.

Die vollständige Theorie dieser Erscheinungen ist von H. Müller gefunden worden, und ist folgende: Die Lichtquelle für die Beleuchtung des inneren Auges ist in diesem Falle das Netzhautbildchen der Lichtflamme, welches, da das Licht weit vom Zentrum des Gesichtsfeldes absteht, auf dem Seitenteile der Netzhaut entworfen wird. Da das Licht sich übrigens dem Auge sehr nahe befindet, kann sein Netzhautbild ziemlich groß sein und genügend viel Licht in den Glaskörper hinein zurückwerfen, um eine merkliche Lichtperzeption in der ganzen Netzhaut anzuregen. Die Art der Beleuchtung ist also ähnlich derjenigen der ersten Methode, nur dadurch unterschieden, daß die Licht aussendende Stelle der Augenwand ihr Licht nicht von außen durch die Sclerotica, sondern von vorn durch die Pupille empfängt. Da die Bilder auf den Seitenteilen der Netzhaut nicht scharf sind, das Bildchen der Flamme in diesem Falle, um hinreichend Licht zu geben, auch ziemlich ausgedehnt sein muß, so erklärt es sich leicht, daß man die Einzelheiten der feineren Gefäßverzweigungen nicht so gut wahrnimmt wie bei der ersten Methode. Die Art der Bewegung des Gefäßbaums erklärt sich vollständig aus H. Müllers Theorie. Es sei in Fig. 94 k der Knotenpunkt des Auges und v ein Netzhautgefäß. Wenn die Lichtquelle in a sich befindet, fällt ihr Netzhautbild nach b, das von b ausgehende Licht wirft den Schatten des Gefäßes v nach c, und wenn wir ck ziehen und verlängern, ist diese Verlängerung kd die Richtung, in welcher der Schatten des Gefäßes v im Gesichtsfelde erscheint. Bewegen wir den Lichtpunkt von a nach α, so rückt b nach β, c nach γ, d nach δ; es verschiebt sich also d in gleichem Sinne wie a. Wenn hingegen a sich senkrecht gegen die Ebene der Zeichnung bewegt, ist es umgekehrt. Wenn a vor der genannten Ebene steht, liegt b dahinter, c wieder davor, d dahinter. Wenn also a sich nach vorn (vor die Ebene der Zeichnung) bewegt, bewegt sich d nach hinten, und umgekehrt, ganz wie es den Beobachtungen entspricht.

Die Erscheinung der hellen Scheibe in der Mitte des Gesichtsfeldes mit dem halbmondförmigen Schatten erklärt H. Müller nicht ohne Wahrscheinlichkeit für den Schatten der Netzhautgrube. Wenn in Fig. 95 bei *c* die Netzhautgrube sich befindet, und in ihrer Tiefe die Stelle des direkten Sehens, das Licht bei *a* steht, sein Netzhautbild bei *b*, so wird der Schatten des nach *b* hingewendeten erhabenen Randes der Netzhautgrube gerade auf den Visierpunkt fallen, und der ganze Schatten der Netzhautgrube auf der Netzhaut selbst vom Visierpunkte aus dem Lichte zugewendet, im Gesichtsfelde dem Lichte abgewendet sein, wie dies die Beobachtung lehrt. Wenn man das Licht *a* mehr der Gesichtslinie nähert, und infolge davon *b* näher nach *c* rückt, bemerke ich in meinem Auge einen hellen Streifen an der Außenseite des halbmondförmigen Schattens, der wohl von Licht herrührt, welches von hinten, von der Netzhautseite her, auf die Oberfläche der Netzhautgrube gefallen und dort reflektiert ist, wie es in Fig. 95 durch den punktierten Strahl $\alpha\beta\gamma$ angedeutet ist. Bei Personen, deren Netzhautgrube weniger steil ansteigende Seiten hat, kann dagegen ein solcher Schatten ganz fehlen.

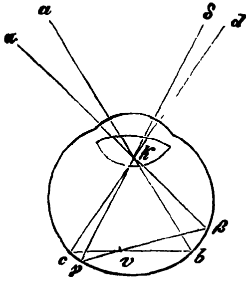


Fig. 94.

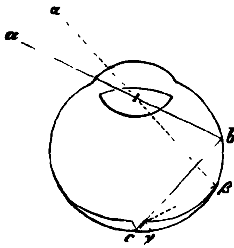


Fig. 95.

3. Die dritte Methode zur Beobachtung der Netzhautgefäße besteht darin, daß man durch eine enge Öffnung nach einem breiten lichten Felde, z. B. dem hellen Himmel, blickt und die Öffnung vor der Pupille schnell hin und her bewegt. Die Netzhautgefäße erscheinen sehr fein gezeichnet, dunkel auf dem hellen Grunde, und bewegen sich im Gesichtsfelde gleichsinnig mit der Öffnung. In der Mitte, entsprechend dem Visierpunkte, sieht man die gefäßlose Stelle, die mir ein fein granuliertes Ansehen zu haben scheint, und in welcher sich ein runder Schatten bei den Bewegungen der Öffnung herumbewegt. Bei horizontalen Bewegungen der Öffnung sieht man nur die vertikalen Gefäße, bei vertikalen Bewegungen die horizontal verlaufenden. Dieselbe Gefäßfigur sieht man auch, wenn man in ein zusammengesetztes Mikroskop hineinblickt, ohne ein Objekt unterzulegen, so daß man nur den gleichmäßig hellen Kreis der Blendung sieht. Wenn man das Auge über dem Mikroskope etwas hin und her bewegt, erscheinen in der Blendung des Mikroskops die Gefäße der Netzhaut sehr fein und scharf gezeichnet, und zwar besonders deutlich immer die Gefäße, welche senkrecht gegen die Richtung der Bewegung verlaufen, während diejenigen verschwinden, welche der Richtung der Bewegung parallel verlaufen.

Nach den beiden ersten Methoden fiel das Licht aus einer ungewöhnlichen Richtung her auf die Netzhaut, und es fiel deshalb auch der Schatten der Netzhautgefäße auf Teile der Netzhaut, welche bei dem gewöhnlichen Sehen von diesem Schatten nicht getroffen werden, und von denen die Beschattung daher als ein ungewöhnlicher Zustand leicht empfunden wird. Bei der beschriebenen dritten Methode dagegen fällt das Licht auf dem gewöhnlichen Wege, nämlich durch die Pupille, in das Auge. Ist die ganze Pupille frei und das Auge nach dem hellen Himmel gewendet, so gehen von jedem Punkte der Pupillarebene nach jeder Richtung in den Hintergrund des Auges hinein Lichtstrahlen aus, ganz so als wäre die Pupille selbst die leuchtende Fläche. Unter dem Ein-

flusse dieser Beleuchtung müssen die Netzhautgefäße einen breiten verwaschenen Schatten auf die hinter ihnen liegenden Netzhautpartien werfen, wobei der Kernschatten etwa nur vier- bis fünfmal so lang sein wird, als der Durchmesser des Gefäßes. Da nach E. H. Weber der dickste Ast der *Vena centralis* 0,017 Par. Linien (0,038 mm) im Durchmesser hat, und die Netzhaut nach Kölliker im Hintergrunde des Auges 0,22 mm dick ist, läßt sich annehmen, daß der Kernschatten der Gefäße nicht bis zur hinteren Fläche der Netzhaut reichen wird. Wenn wir aber eine enge Öffnung vor die Pupille bringen, wird der Schatten der Gefäße notwendig schmaler, schärfer begrenzt, der Kernschatten länger, so daß Teile der Netzhaut, die sonst im Halbschatten lagen, teils in den Kernschatten kommen, teils mit den unbeschatteten Teilen gleich stark erleuchtet werden.

Daß wir beim gewöhnlichen Sehen die Gefäßschatten nicht wahrnehmen, erklärt sich wohl daraus, daß die Empfindlichkeit der beschatteten Stellen der Netzhaut größer, ihre Reizbarkeit weniger erschöpft ist als die der übrigen Teile der Netzhaut. Sobald wir aber den Ort des Schattens oder seine Ausbreitung verändern, wird derselbe wahrnehmbar, weil die schwache Beleuchtung nun auf ermüdete, weniger reizbare Netzhautelemente fällt. Der reizbarere, früher beschattete Teil der Netzhautelemente dagegen wird nun zum Teil von vollem Lichte getroffen, und empfindet dies stärker. Daher erklärt sich, daß zuweilen, namentlich im Anfange der Versuche, der Gefäßbaum für Augenblicke auch wohl hell auf dunklerem Grunde erscheint, und überhaupt bei manchen Personen der helle Teil der Erscheinung die Aufmerksamkeit mehr auf sich lenken kann als der dunkle. Sobald der Schatten der Gefäße indessen bei unseren Versuchen seine neue Stelle dauernd behauptet, werden die neu beschatteten Stellen allmählich reizbarer, die früher beschatteten scheinen dagegen ihre erhöhte Reizbarkeit schnell zu verlieren, und die Erscheinung verschwindet wieder. Um sie dauernd zu sehen, ist es also nötig, den Ort des Schattens stets wechseln zu lassen, und bei gradlinigen Bewegungen der Lichtquelle bleiben nur die Gefäße sichtbar, deren Schatten den Platz wechselt. Auf diese Veränderungen der Reizbarkeit kommen wir in § 25 unten noch näher zurück.

Um zu entscheiden, ob die entoptisch gesehenen Objekte vor oder hinter der Pupille oder etwa nahe der Netzhaut liegen, dazu ist die Beachtung der Parallaxe nach Listings Vorschlag ausreichend. Es sei *a* Fig. 96 das von den Augenmedien entworfene Bild des leuchtenden Punktes, *c* der Punkt des direkten Sehens auf der Netzhaut. *fe* die Ebene der Pupille oder vielmehr deren von der Linse entworfenes Bild, welches indessen nur wenig von seinem Objekte abweicht. Endlich sei *d* ein dunkles Objekt hinter der Pupille. Wenn die Linie *ac* die Pupille in *g* schneidet, so fällt der Schatten des Punktes *g* auf den Punkt des direkten Sehens *c*, also *g* entspricht dem direkt gesehenen Punkte des entoptischen Bildes der Pupille. Ziehen wir die gerade Linie *ad*, und verlängern sie, bis sie die Netzhaut in *b* schneidet, so ist *b* der Ort des Schattens von *d*. Nennen wir den Durchschnittspunkt der Linie *ad* mit der Pupillarebene *h*, so fällt die Projektion des Punktes *h* der Pupille gleichzeitig auf *b*; *d* und *h* decken sich im entoptischen Gesichtsfelde. Wenn in der Linie *ab* auch noch vor der Pupille ein Objekt *i* liegt, so deckt sich dieses ebenfalls mit *h* im entoptischen Gesichtsfelde.

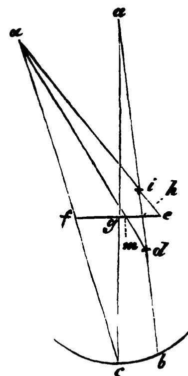


Fig. 96.

Wenn nun aber das Auge oder der leuchtende Punkt so bewegt wird, daß ein anderer Punkt der Pupille, etwa f, entoptisch direkt gesehen wird, der leuchtende Punkt etwa nach α in die Verlängerung der Linie cf rückt, so verändert sich auch die Lage des Schattens von d und i gegen den der Pupille. Ziehen wir αd und αi. Ersteres schneide die Ebene der Pupille in m, letzteres verlängert in e, so sind m und e die Punkte der Pupille, deren entoptische Bilder sich mit denen der Objekte d und i jetzt decken. Während also der Visierpunkt in dem entoptischen Bilde von g nach f gerückt ist, hat das Bild des hinter der Pupille gelegenen Objekts d eine Bewegung in gleichem Sinne von h nach m, das des vor der Pupille gelegenen Objekts in entgegengesetztem Sinne von h nach e ausgeführt. Nach der Bezeichnungsweise von Listing hat also d eine positive Parallaxe, und i eine negative. Es ist bei geringer Übung immer leicht zu entscheiden, ob die entoptisch gesehenen Objekte sich im Verhältnis zu der kreisförmigen Begrenzung des Gesichtsfeldes in gleichem oder entgegengesetztem Sinne wie der Visierpunkt verschieben, und danach entscheidet man leicht, ob sie vor oder hinter der Pupille liegen.

Um die Entfernung der im Glaskörper schwebenden Objekte genauer messen zu können, hat D. Brewster zuerst eine Methode eingeschlagen, bei welcher er zwei Bündel homozentrischer Strahlen in das Auge dringen ließ, und dadurch zwei Schatten eines jeden Objekts erzeugte. Aus der Entfernung der Schatten voneinander kann dann die Entfernung des Objekts von der Netzhaut gefunden werden. Brewster sah zu dem Ende durch eine vor dem Auge stehende Linse nach zwei nebeneinander gestellten Flammen hin. Donders hat diese Methode geändert, indem er vor das Auge ein Metallplättchen mit zwei kleinen, $1^1/_2$ mm voneinander entfernten Öffnungen bringt. Durch diese sieht er nach einem weißen, stark erleuchteten Papiere hin, auf welchem die entoptischen Erscheinungen projiziert erscheinen. Er mißt nun den Abstand der Mittelpunkte der beiden sich gegenseitig bedeckenden kreisförmigen Bilder der Pupille, welcher einfach dadurch gefunden wird, daß man den Durchmesser des unbedeckten Teiles dieser Kreise mißt. Ferner mißt er den Abstand der Doppelbilder des betreffenden entoptischen Objekts. Der letztere verhält sich zum Abstande der beiden Kreise wie der Abstand des Objekts von der Netzhaut, welcher gefunden werden soll, zum scheinbaren Abstande der Pupille von der Netzhat (18 mm). So kann der Abstand der Objekte von der Netzhaut leicht berechnet werden.

Doncan hat die Methode von Donders insofern geändert, daß er seine Messungen nach dem Prinzipe der mikroskopischen Messung *à double vue* ausführt. Das eine Auge blickte durch eine oder zwei feine Öffnungen nach einem kleinen Hohlspiegel, der das Licht des Himmels reflektierte, das andere auf eine in der Entfernung des deutlichen Sehens gelegene Tafel, und der Beobachter mißt mit dem Zirkel auf dieser Tafel die Größe der entoptischen Objekte und den Abstand ihrer Doppelbilder, sowie den Abstand entsprechender Punkte am Rande der Iris. Um aus der scheinbaren Größe der entoptischen Objekte ihre wahre Größe zu berechnen, muß man noch den Abstand der Öffnung, durch welche man sieht, von der Hornhaut kennen. Am besten ist es, diese Öffnung in den vorderen Brennpunkt des Auges (12 mm vor der Hornhaut) anzubringen, dann sind die Schatten der entoptischen Objekte so groß wie die Objekte selbst. Die mit dem Zirkel gemessene scheinbare Größe dieser Objekte im Gesichtsfelde verhält sich aber zur wahren Größe des Schattens auf der Netzhaut wie die Entfernung des messenden Zirkels vom Auge zur kleineren Hauptbrennweite des Auges (15 mm).

Um das Plättchen mit der Öffnung wenigstens nahehin in die vordere Brennebene des Auges zu bringen, befestigt man es am Ende eines kurzen Röhrchens von passender Länge.

Die scheinbare Größe der Bewegung des Gefäßbaums im Gesichtsfelde bei der ersten eben beschriebenen Methode, ihn sichtbar zu machen, hat H. Müller gemessen, während gleichzeitig die Größe der Verschiebung des leuchtenden Brennpunktes auf

der Sclerotica mit dem Zirkel gemessen wurde. Es kann daraus, wenigstens annähernd, durch Konstruktion oder Rechnung die Entfernung der Schatten werfenden Gefäße von der den Schatten wahrnehmenden Schicht der Netzhaut bestimmt werden. Man zeichne, wie in Fig. 92, den Querschnitt des Auges in natürlicher Größe. Der Brennpunkt auf der Sclerotica sei zwischen den Punkten a und b hin und her bewegt. Es sei α der Schatten eines in der Nähe des gelben Flecks gelegenen Gefäßes v. dessen scheinbare Bewegung man gemessen hat, für die Lage des Lichtpunktes in a, so muß dies Gefäß in der geraden Linie $a\alpha$ liegen. Es sei $\alpha\beta$ die aus der scheinbaren Verschiebung des Gefäßes im Gesichtsfelde berechnete wahre Verschiebung auf der Netzhaut, also β der Ort des Gefäßschattens für den Fall, wo sich der Brennpunkt in b befindet. Man ziehe die gerade Linie $b\beta$. Der Punkt v, wo $b\beta$ und $a\alpha$ sich schneiden, muß dann der Ort des Gefäßes sein, dessen Entfernung von der Netzhaut durch Messung oder Rechnung gefunden werden kann. H. Müller erhielt auf diese Weise in mehreren Versuchen für die Entfernung der Gefäße von der empfindenden Schicht 0.17; 0.19 bis 0.21; 0,22; 0,25 bis 0,29; 0,29 bis 0.32 mm. Bei drei anderen Beobachtern 0.19; 0.26; 0.36 mm. Da nach den anatomischen Messungen desselben Beobachters die Entfernung der Gefäße von den Stäbchen und Zapfen in der Gegend des gelben Flecks zwischen 0.2 und 0.3 mm beträgt, so wird es daraus wahrscheinlich, daß die Zapfen die den Schatten empfindenden Gebilde seien, worauf auch andere Verhältnisse hindeuten, welche ich in § 18 auseinandersetzen werde.

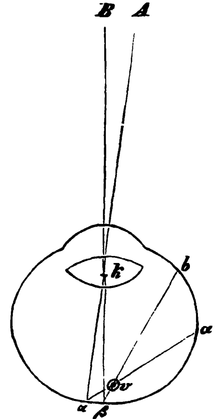


Fig. 92.

Dechales[1], ein Jesuit des 17. Jahrhunderts, stellte zuerst eine Ansicht über die Entstehung der fliegenden Mücken auf, und zwar die richtige, daß es Schatten seien von Körperchen, die in der Nähe der Netzhaut schwimmen. Pitcairn[2] verlegte sie dagegen auf die Netzhaut selbst, und Morgagni[3] in alle Augenmedien, obgleich die weiter nach vorn liegenden ohne die Anwendung schmaler Lichtquellen nicht wohl gesehen sein können. Ebenso irrt auch de la Hire[4], wenn er die festen Mücken ausschließlich auf die Netzhaut verlegt, die beweglichen in die wässrige Feuchtigkeit. Le Cat[5] beschreibt einen Versuch, der dem Prinzipe nach die Methode der entoptischen Untersuchung vollständig enthält, indem er das umgekehrte Schattenbild einer dicht vor das Auge gehaltenen Nadel im Zerstreuungskreise eines kleinen Lichtpunktes wahrgenommen hat. Auch Aepinus[6] hat etwa zu derselben Zeit den Schatten der Iris, die Erweiterung und Verengerung der Pupille entoptisch wahrgenommen und richtig verstanden. Aber erst seit 1760[7] hat man angefangen, kleine Öffnungen und starke Linsen anzuwenden, um die fliegenden Mücken deutlicher zu sehen, welches Verfahren übrigens auch dem Dechales nicht ganz unbekannt gewesen war.

Eine strengere Theorie der Erscheinungen, die Methoden, den Ort der Körperchen im Auge zu beurteilen, wurden erst viel später durch Listing[8] und Brewster[9] fest-

---

[1] Cursus seu mundus mathematicus. Lugduni 1690. T. III. p. 402.
[2] Pitcairnii Opera. Lugd. Bat. p. 203. 206.
[3] Adversaria anatomica VI. Anim. LXXV. p. 94. Lugd. Bat. 1722.
[4] *Accidens de la vue.* p. 358.
[5] *Traité des sens.* Rouen 1740. p. 298.
[6] Novi Comment. Petropol. Vol. VII. p. 303.
[7] *Histoire de l'Acad. d. sciences.* 1760. p. 57. Paris 1766.
[8] Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen 1845.
[9] *Transactions of the Roy. Soc. of Edinb.* XV. 377.

gestellt, denen später DONDERS[1] folgte. Des letzteren Schüler DONCAN[2] wies dann die Übereinstimmung der entoptisch gesehenen Gegenstände mit mikroskopischen Strukturen des Glaskörpers nach; dasselbe versuchte JAMES JAGO[3]. Beschreibungen der verschiedenen Formen entoptischer Objekte gaben außer den eben Genannten auch STEIFENSAND[4], MACKENZIE[5], APPIA[6].

Die subjektive Erscheinung der Zentralgefäße hat PURKINJE[7] zuerst entdeckt und sie nach den drei oben beschriebenen Methoden sichtbar gemacht. Auch bei Erregung des Auges durch Druck und Blutandrang hat er sie wahrgenommen. GUDDEN[8] machte auf die für die Theorie der Erscheinung wichtige Bedeutung der Bewegung des Schattens aufmerksam. Die Theorie der Erscheinung bei der Anwendung homozentrischen Lichts von der Pupille aus oder eines Brennpunktes auf der Sclerotica schien keine Schwierigkeit zu haben. Wohl aber machte MEISSNER[9] auf die abweichenden Verhältnisse aufmerksam, welche bei der Bewegung eines Lichts unterhalb des Auges eintreten, und leitete daraus Bedenken gegen die bisherige Erklärungsweise überhaupt ab. Diese wurden von H. MÜLLER[10] beseitigt, welcher die oben hingestellte Theorie dieser Art des Versuchs fand.

Schon PURKINJE erwähnt, daß in der Mitte des Gesichtsfeldes ein heller Fleck erschiene, der einer Grube ähnlich sehe; BURow[11] beschrieb die entoptische Erscheinung des gelben Flecks genauer, deutete sie aber als die Erscheinung einer Hervorragung, nicht eines Grübchens, vermöge der unrichtigen älteren Theorie des Versuchs, die durch H. MÜLLER verbessert wurde.

1690. DECHALES, Cursus seu mundus mathematicus. Lugduni. T. III. p. 402.
1694. DE LA HIRE, *Accidens de la vue* in *Mém. de l'Acad. d. sc.* p. 358.
PITCAIRNII Opera. Lugd. Bat. p. 203. 206.
1722. MORGAGNI Adversaria anatomica VI. Anim. LXXV. p. 94. Lugd. Bat.
1740. LE CAT, *Traité des sens.* Rouen. p. 298.
AEPINUS, Novi Comment. Petrop. VII. p. 303.
1760. *Histoire de l'Acad. d. sc. pour l'an* 1760. p. 57.
1819. PURKINJE, Beiträge zur Kenntnis des Sehens. S. 89*.
1825. Derselbe. Neue Beiträge. S. 115. 117*.
1842. STEIFENSAND in POGGENDORFFS Ann. LV. p. 134*; v. AMMONS Monatsschrift für Medizin. I. 203.
1845. *LISTING, Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen.*
BREWSTER in *Transactions of the Roy. Soc. of Edinb.* XV. 377.
MACKENZIE, *Edinb. Medical and Surgical Journal.* July 1845.
1846. DONDERS in Nederlandsch Lancet. 1846—47. 2. Serie. D. II. bl. 345. 432. 537.
1848. BREWSTER in *Phil. Magaz.* XXXII. 1; *Arch. d. sc. phys. et natur. de Genève.* VIII. 299.
1849. GUDDEN in J. MÜLLERS Archiv. 1849. S. 522*.
1853. APPIA, *De l'oeil vu par lui même.* Genève.

---

[1] Nederl. Lancet. 1846—47. 2. Serie. D. II. bl. 345. 432. 537.
[2] De corporis vitrei structura. Diss. Utrecht 1854; Onderzoekingen ged. in het Physiol. Laborat. d. Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. p. 171.
[3] *Proceed. Roy. Soc.* 18. Jan. 1855.
[4] POGGENDORFFS Ann. LV. p. 134; v. AMMONS Monatsschrift f. Med. I. 203.
[5] *Edinburgh Medical and Surgical Journal.* July 1845.
[6] *De l'oeil vu par lui même.* Genève 1853.
[7] Beiträge zur Kenntnis des Sehens. 1819. S. 89. Neue Beiträge. 1825. S. 115. 117.
[8] J. MÜLLERS Archiv für Anat. u. Physiol. 1849. S. 522.
[9] Beiträge zur Physiologie des Sehorgans. 1854.
[10] Verhandl. der med.-physik. Ges. zu Würzburg. IV. 100. V. Lief. 3.
[11] J. MÜLLERS Archiv. 1854. S. 166.

1854. *A. DONCAN, De corporis vitrei structura. Dissert. Trajecti ad Rhenum; Onderzoekingen ged. in het Physiol. Laborat. d. Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. p. 171. BUROW in J. MÜLLERS Archiv. 1854. S. 166.
1855. JAMES JAGO in *Proceedings of the Roy. Soc.* 18. Jan. 1855.

Nachtrag.

VIERORDT hat auf hellen Flächen bei intermittierender Beleuchtung — er bewegte vor den Augen die Hand mit gespreizten Fingern hin und her — eine strömende Bewegung gesehen, die er für die Blutbewegung in den Netzhautgefäßen erklärte; MEISSNER und ich selbst haben diese Bewegung nur in Form uferloser Strömchen gesehen, denen ich VIERORDTS Deutung nicht zu geben wagte. Doch folgt daraus nicht, daß VIERORDT die Erscheinung nicht deutlicher und bestimmter gesehen haben kann, und daß es nicht wirklich bei ihm ein Ausdruck des Blutlaufs war.

Außerdem hatten PURKINJE und J. MÜLLER, wenn sie nach einer ausgedehnten hellen Fläche blickten, helle Punkte im Gesichtsfelde erscheinen und eine Strecke fortlaufen sehen, so daß dieselben nach unregelmäßigen Pausen immer wieder an denselben Stellen auftauchen und immer wieder denselben Weg mit derselben ziemlich großen Geschwindigkeit zurücklegen. Diese Erscheinung sieht man nun nach einer Bemerkung von O. N. ROOD sehr viel besser, wenn man durch ein dunkles blaues Glas nach dem Himmel sieht. Ich fixiere dabei einen Punkt der Fensterscheibe, um die bewegten Körperchen immer wieder an derselben Stelle zu sehen und die Lage ihrer Bahnen mit der auf dieselbe Fensterscheibe projizierten Gefäßfigur zu vergleichen.

Nachdem ich diese Beobachtungen wiederholt habe, glaube ich nun ebenfalls nicht mehr zweifeln zu können, daß sie von der Blutbewegung herrühren, und zwar so, daß ein einzelnes größeres Körperchen sich in einem der engeren Gefäße klemmt. Dann pflegt vor einem solchen das Gefäß relativ leer zu werden, hinter ihm dagegen stauen sich die Blutkörperchen in größerer Menge an. Sobald das Hemmnis sich löst, strömt der ganze Haufen schnell davon. Es sind dies Vorgänge, die man bei Beobachtung des Kapillarkreislaufes mit dem Mikroskope oft sieht. Bei dem genannten Versuche geht im Sehfelde voran ein hellerer länglicher Streifen, entsprechend der leeren Stelle des Gefäßes vor dem Hemmnis; diesem folgt ein dunklerer Schatten, der, wie ich glaube, den zusammengedrängten Blutkörperchen entspricht.

In meinem rechten Auge sehe ich diese Erscheinung in zwei parallelen Gefäßchen links neben dem Fixationspunkt sehr deutlich und oft sich wiederholen, zuweilen in beiden gleichzeitig; die Bewegung ist scheinbar nach oben gerichtet und das bewegte Gebilde verschwindet, indem es sich mit beträchtlich gesteigerter Geschwindigkeit durch eine *S* förmige Krümmung hindurchwindet. Nun finde ich im entoptischen Bilde des Gefäßbaums sowohl die beiden parallelen Gefäße an der angegebenen Stelle, als auch die *S* förmige Krümmung ihrer Vereinigungsstelle, welche in ein größeres Venenstämmchen hinüberführt, so daß beide Beobachtungsmethoden sich vollständig entsprechen. Übrigens sind die genannten Gefäße nicht die einzigen, in denen eine solche Bewegung sichtbar wird, sondern es gibt noch viele andere Stellen in dem Sehfelde desselben Auges, die aber weiter vom Fixationspunkte abliegen und nicht so charakteristische Formen haben.

Danach würde die genannte Erscheinung also als der optische Ausdruck kleiner Hemmungen des Blutlaufs zu betrachten sein, die nur in gewissen Engpässen des Gefäßbaums und nur beim Vorübergang etwas größerer Körperchen aufzutreten pflegen.

1853. Trouessart, *Suite des recherches concernant la vision. C. R.* XXXVI, 144—146.
1856. Vierordt, Wahrnehmung des Blutlaufs in den Netzhautgefäßen. Archiv für physiol. Heilkunde. 1856. Heft II.
— Meissner im Jahresbericht für 1856. Henle und Pfeufer Zeitschr. (3) I, 565—566.
1857. J. Jago, *Ocular spectres, structures and functions as mutual exponents. Proc. Roy. Soc.* VIII, 603—610. *Phil. Mag.* (4) XV, 545—550.
1860. O. N. Rood, *On a probable means of rendering visible the circulation in the eye. Silliman J.* (2) XXX, 264—265; 385—386.
1861. L. Reuben, *On normal quasi-vision of the moving blood-corpuscles within the retina of the human eye. Silliman J.* (2) XXXI, 325—388; 417.

Zusatz von A. Gullstrand.

Zwei in das Gebiet der Dioptrik fallende entoptische Erscheinungen seien hier kurz erwähnt, welche das gemeinsam haben, daß sie nach der ersten Entdeckung unbeachtet geblieben sind, um dann wieder die Aufmerksamkeit auf sich zu lenken.

Nähert man im dunklen Zimmer bei ruhiger Stellung des Auges eine Kerzenflamme der Gesichtslinie von der Temporalseite her, so sieht man manchmal einen schwachen Lichtfleck sich in entgegengesetzter Richtung bewegen. Tscherning, welcher diese zuerst von Becker* erklärte Erscheinung wieder beschrieben hat, empfiehlt die Kerzenflamme unterhalb der Gesichtslinie vorbeizuführen.** Der Lichtfleck erscheint verschiedenen Personen in verschiedener Schärfe. Mir selbst gelingt es nur bei einzelnen Gelegenheiten, denselben zu sehen, während er meistens von der Gefäßfigur verdeckt wird, ohne daß ich die Bedingungen eruieren könnte, welche das Hervortreten desselben begünstigen. Andere sehen ihn so deutlich, daß sie darin ein umgekehrtes Bild der Flamme erkennen. Es handelt sich eben um den in der konstruktiven Optik sogenannten „Lichtfleck“, welcher von der Reflexion des Lichtes an den brechenden Flächen herrührt. Bei der doppelten Reflexion kann nur die vordere Hornhautfläche in Betracht kommen, da nur hier ein hinreichender Unterschied der Brechungsindizes vorhanden ist. Die Rechnung lehrt nun, daß das Licht, welches zuerst in der hinteren Linsenfläche nach vorn, dann in der vorderen Hornhautfläche wieder nach hinten reflektiert wird, ein unweit der Netzhaut belegenes aufrechtes Bild der Flamme erzeugt, welches somit umgekehrt gesehen wird und sich scheinbar in entgegengesetzter Richtung gegen die Flamme bewegen muß. Das in der vorderen Linsenfläche nach vorn und dann in der vorderen Hornhautfläche nach hinten reflektierte Licht erzeugt ein in der Gegend der hinteren Linsenfläche belegenes Bild, welches nur einen sehr großen Zerstreuungskreis auf die Netzhaut verursachen kann, der von dem in den Augenmedien diffus reflektierten Lichte nicht unterschieden wird.

Die meisten Personen sehen im dunklen Zimmer bei dilatierter Pupille farbige Ringe um kleine Lichtquellen, welche besonders deutlich gegen dunklen Hintergrund auftreten, und deren Winkeldurchmesser 6 bis 7° beträgt. Die

* O. Becker, Über Wahrnehmung eines Reflexbildes im eigenen Auge. Wiener Med. Wochenschrift 1860, S. 670 und 684.

** Tscherning, *Optique physiologique.* Paris 1898. p. 43.

Ringe enthalten die Farben des Spektrums, wobei rot nach außen liegt, und der angegebene Durchmesser dem Gelb entspricht. Bei künstlichen Lichtquellen, welche wenig kurzwelliges Licht enthalten, sieht man das Spektrum gewöhnlich nur bis blaugrün recht deutlich. Hält man vor das Auge ein kleines Loch, so verschwindet der Ring vollständig, sobald dieses auf der Pupille zentriert ist. Verschiebt man es aber in radiärer Richtung, so treten in dem Augenblicke, wo es den Rand der dilatierten Pupille erreicht, zwei kleine Spektra auf, deren Verbindungslinie durch die Flamme geht, und senkrecht auf der Verschiebungsrichtung steht. Auf diese Weise kann man nach Belieben zwei diametral einander gegenüberliegende Teile des Ringes hervortreten lassen. Die Anordnung der Farben charakterisiert den Ring als ein Interferenzspektrum, und der Versuch mit dem Loch beweist, daß es sich um ein radiäres, nur in der Nähe des Pupillenrandes wirkendes Gitter handelt, wie es nur im Linsenkortex vorhanden ist. Wegen des strahlenförmigen Aufbaues der Linse haben aber die Linsenfasern keinen exakt radiären Verlauf, können deshalb auch keinen exakt ringförmigen Typus bedingen. Man kann in Übereinstimmung hiermit konstatieren, daß der Ring wie aus mehreren kleinen, einander nicht vollkommen ähnlichen Bruchstücken zusammengesetzt erscheint. Um die Entstehung des Ringes an einem radiären Gitter zu beweisen, kann man auch ein undurchsichtiges Papier mit gerader Kante vorschieben. Geschieht dies beispielsweise von der Temporalseite her mit vertikal gestellter Kante, bis nur ein kleines Segment der Pupille am nasalen Rande frei bleibt, so sieht man den oberen und unteren Teil des Ringes, während die beiden Seitenteile verschwunden sind. Von dem in der Linse enthaltenen Gitter ist dann nur ein Teil unbedeckt, welcher horizontale Fasern enthält, nebst solchen, deren Verlaufsrichtung wenig von der horizontalen abweicht, weshalb nur diejenigen Teile des Ringes sichtbar sein können, in welchen die Tangente zu der Verlaufsrichtung unbedeckter Fasern parallel ist.

Manche Menschen haben bei der Erschlaffung der Akkommodation oder in Aufregungszuständen hinreichend große Pupillen, um den Ring unmittelbar zu sehen. Anderen gelingt nur der Versuch mit dem Loche ohne künstliche Erweiterung der Pupille, wenn das andere Auge zugedeckt ist; bei anderen ist wiederum ohne Mydriaticum überhaupt nichts vom Farbenring zu sehen. Die Erscheinung wurde sowohl von Donders* wie von Beer** beschrieben und richtig gedeutet, um dann von Druault*** und Salomonsohn† wieder näher untersucht zu werden. Letzterer, bei welchem sich eine Zusammenstellung der Literatur findet, deutet irrtümlicherweise die bei Glaukom auftretenden farbigen Ringe auf dieselbe Weise. Diese verschwinden aber beim Vorschieben einer Karte allmählich und überall gleichzeitig, wodurch ihr Entstehen durch Diffraktion an kleinen rundlichen oder polygonalen Gebilden bewiesen wird, wie sie durch die Hornhauttrübung geschaffen werden. Auch ist ihr Durchmesser

* Nach der Angabe von J. H. A. Haffmans, Beiträge zur Kenntnis des Glaukoms. Arch. f. Ophth. VIII. 2. S. 124. 1862.

** Beer, Über den Hof um Kerzenflammen. Poggendorffs Ann. Bd. 84. S. 518. 1851; Bd. 88. S. 595. 1853.

*** A. Druault, *Sur la Production des anneaux colorés autour des flammes. Arch. d'opht.* 18. p. 312. 1898.

† H. Salomonsohn, Über Lichtbeugung an Hornhaut und Linse. Arch. f. Physiologie. Jahrg. 1898. S. 187.

größer. Dagegen kommt es vor, daß in Fällen, wo das Glaukom die nötige Pupillenerweiterung ohne gleichzeitige Hornhauttrübung verursacht, die physiologischen in der Linse entstehenden Farbenringe sichtbar werden und mit echt glaukomatösen verwechselt werden können.

Auf dieselbe Weise und mit demselben Verhalten gegenüber einem vorgeschobenen Blatt können unter physiologischen Verhältnissen farbige Ringe sichtbar werden, welche von unregelmäßiger Eintrocknung der Hornhautoberfläche oder Sekretauflagerung auf derselben herrühren. Viele Menschen sehen habituell einen solchen Ring das um eine helle Lichtquelle sichtbare diffuse Licht nach außen abgrenzen, wobei der größere in der Linse entstehende Ring durch einen dunklen Zwischenraum vom ersteren getrennt ist. G.

§ 16. Das Augenleuchten und der Augenspiegel.

Von dem Lichte, welches auf die Netzhaut gefallen ist, wird ein Teil absorbiert, namentlich durch das schwarze Pigment der Aderhaut, ein anderer Teil wird diffus reflektiert, und kehrt durch die Pupille nach außen zurück.

Unter gewöhnlichen Verhältnissen nehmen wir nichts von dem Lichte wahr, welches aus der Pupille eines anderen Auges zurückkehrt, diese erscheint uns vielmehr ganz dunkelschwarz. Der Grund hiervon ist hauptsächlich in den eigentümlichen Brechungsverhältnissen des Auges zu suchen, zum Teil auch darin, daß von den meisten Stellen des Augenhintergrundes wegen des schwarzen Pigments verhältnismäßig wenig Licht zurückgeworfen wird.

Bei allen Systemen brechender Flächen, welche ein genaues Bild eines leuchtenden Punktes entwerfen, können die Lichtstrahlen genau auf denselben Wegen, auf denen sie von dem leuchtenden Punkte zu dessen Bilde gegangen sind, auch rückwärts von dem Bilde zu dem leuchtenden Punkte zurückgehen. Oder wenn man den leuchtenden Punkt an den Ort des Bildes bringt, wird nun das Bild an dem früheren Orte des leuchtenden Punktes entworfen.

Daraus folgt: Wenn das menschliche Auge genau für einen leuchtenden Körper akkommodiert ist, und von diesem ein genaues Bild auf seiner Netzhaut entwirft, und wir betrachten nun die erleuchtete Stelle der Netzhaut als ein zweites leuchtendes Objekt, so wird deren von den Augenmedien entworfenes Bild genau mit dem ursprünglich leuchtenden Körper zusammenfallen, d. h. alles Licht, welches von der Netzhaut aus dem Auge zurückkehrt, wird außerhalb des Auges direkt zu dem leuchtenden Körper zurückgehen, und nicht neben ihm vorbei. Das Auge des Beobachters würde sich, um etwas von diesem Lichte aufzufangen, zwischen den leuchtenden Körper und das beleuchtete Auge einschieben müssen, was ohne weitere Hilfsmittel natürlich nicht angeht, ohne dem beleuchteten Auge das Licht abzuschneiden.

Ebensowenig kann der Beobachter Licht aus dem Auge eines anderen zurückkehren sehen, wenn dies letztere für die Pupille des Beobachters genau akkommodiert ist. Unter diesen Umständen wird nämlich ein genaues dunkles Bild der Pupille des Beobachters auf der Netzhaut des beobachteten Auges entworfen werden. Rückwärts werden die Augenmedien ein Bild dieser dunklen Stelle der Netzhaut gerade auf die Pupille des Beobachters werfen, und somit wird dieser gerade nur den Widerschein seiner eigenen schwarzen Pupille in der fremden sehen.

Daher kommt es, daß man unter gewöhnlichen Umständen auch die stärker Licht reflektierenden Teile im Hintergrunde eines fremden Auges nicht sieht,

wie z. B. die weiße Eintrittsstelle des Sehnerven, die Gefäße. Auch bei Albinos, Personen, denen das Pigment der Chorioidea fehlt, erscheint die Pupille schwarz, sobald man durch einen dunklen, vor ihr Auge gehaltenen Schirm, der nur eine Öffnung von der Größe der Pupille zum Durchsehen hat, verhindert, daß Licht durch ihre Sclerotica in das Innere des Auges dringt.[1] Letzteres ist es, welches das gewöhnliche rote Ansehen der albinotischen Pupille bewirkt. Ebenso erscheint das Objektglas einer *Camera obscura* von vorn gesehen schwarz, wenn man von ihr das Bild eines einzelnen Lichts in einem dunklen Zimmer entwerfen läßt; selbst dann, wenn man als Schirm zum Auffangen des Bildes ein weißes Blatt Papier angebracht hat.

Ist dagegen das beleuchtete Auge weder für den leuchtenden Gegenstand noch für die Pupille des Beobachters genau akkommodiert, so ist es möglich, daß der Beobachter einiges von dem aus der Pupille zurückkehrenden Lichte wahrnehme, die Pupille erscheint ihm dann leuchtend.

Es ist leicht einzusehen, daß der Beobachter von allen denjenigen Punkten der Netzhaut des beobachteten Auges Licht empfangen kann, auf welche das Zerstreuungsbild seiner eigenen Pupille fällt. Supponieren wir einen Augenblick statt der Pupille des Beobachters eine leuchtende Scheibe, deren Zerstreuungsbild in dem beobachteten Auge genau mit dem Zerstreuungsbilde jener Pupille zusammentreffen würde, so gehen Lichtstrahlen von einem oder mehreren Punkten dieser leuchtenden Scheibe nach jedem Punkte ihres Zerstreuungsbildes hin, es können also auch rückwärts Lichtstrahlen von jedem Punkte der Netzhaut, der dem Zerstreuungskreise angehört, nach einem oder mehreren Punkten der leuchtenden Scheibe, d. h. an den Ort der Pupille des Beobachters gelangen. Der Beobachter wird also das beobachtete Auge leuchten sehen, so oft in dem beobachteten Auge das Zerstreuungsbild seiner eigenen Pupille teilweise zusammenfällt mit dem Zerstreuungsbilde eines leuchtenden Gegenstandes.

Blickt daher der Beobachter dicht am Rande eines Lichts vorbei, dessen Strahlen er durch einen dunklen Schirm von seinem eigenen Auge abhält, um nicht geblendet zu werden, nach dem Auge eines anderen, und ist dieses Auge für eine nähere oder viel weitere Entfernung akkommodiert, so erscheint ihm die Pupille rot leuchtend. Diese Anordnung des Versuchs ist schematisch in Fig. 97 dargestellt. *B* ist das Auge des Beobachters, *S* der Schirm, welcher es vor den direkten Lichtstrahlen schützt, *A* der Grundriß einer Lampenflamme, *C* das beobachtete Auge, *B C* die Gesichtslinie des Beobachters, *C d* die des beobachteten Auges, welche beliebig gerichtet sein kann. Der Versuch gelingt auch meist, ohne daß man die Akkommodation des beobachteten Auges berücksichtigt, wenn entweder der Beobachter weit entfernt ist oder wenn der Beobachtete, wie in Fig. 97, seitwärts sieht, weil dann, das Bild des Lichts und der Pupille des Beobachters auf den Seitenteilen der Netzhaut entworfen werden, wo überhaupt die Bilder nicht scharf sind. Am hellsten ist das Leuchten,



Fig. 97.

[1] F. C. Donders in Onderzoekingen gedaan in het Physiologisch Laborat. der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. p. 153. — van Trigt in Nederlandsch Lancet. 3. Ser. D. II. bl. 419.

wenn das einfallende Licht auf die Eintrittsstelle des Sehnerven trifft, weil dessen weiße Substanz das Licht stark reflektiert und wegen ihrer durchscheinenden Beschaffenheit keine hinreichend bestimmte Grenzfläche darbietet, auf der sich das Bild scharf projizieren könnte.

Zu bemerken ist hierbei, daß bei hinreichend starker Beleuchtung auch Licht genug durch die Aderhaut zur Sclerotica dringt, und hier diffus reflektiert wieder zurückkehrt, um wahrgenommen zu werden. Dies Licht verhält sich wie das der Zerstreuungskreise. Daher kann bei starker Beleuchtung auch bei genauer Akkommodation des beobachteten Auges für die Pupille des Beobachters ein schwacher Grad von Leuchten stattfinden, namentlich bei schwach pigmentierten Augen, der sich in der angegebenen Weise erklärt.

Noch besser kann das Augenleuchten beobachtet werden, wenn man nicht direkt das Licht der Flamme in das Auge fallen läßt, sondern von einem Spiegel reflektiert, und der Beobachter durch diesen Spiegel hindurchsieht. A in Fig. 98 sei das Licht, S der Spiegel, welcher aus einer unbelegten Glasplatte bestehen kann. Diese wirft das auffallende Licht so zurück, als käme es von einem Spiegelbilde α der Flamme. C sei das beobachtete Auge, auf dessen Hintergrunde ein kleines Netzhautbildchen des Lichts entworfen wird. Das von der Netzhaut zurückkehrende Licht geht nun, wenn es das Auge verlassen hat, zunächst in der Richtung des Spiegelbildes α zurück, trifft wieder auf die spiegelnde Platte, wo ein Teil nach dem wirklichen Lichte hin zurückgeworfen wird, während ein anderer durch die Platte geht und seinen Weg nach dem Orte des Spiegelbildes hin fortsetzt. Hier kann es nun von dem Auge des Beobachters B aufgefaßt werden. Dieser sieht bei der beschriebenen Anordnung das beobachtete Auge leuchten.

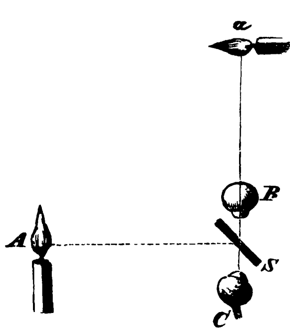


Fig. 98.

Statt der unbelegten Glasplatte kann auch ein belegter Glasspiegel oder Metallspiegel gebraucht werden, mit einer engen Öffnung, durch welche der Beobachter sieht.

Wenn der Beobachter unter diesen Umständen nun auch den Hintergrund des beobachteten Auges erleuchtet sieht, so kann er doch in der Regel nichts im Hintergrunde dieses Auges erkennen, weil er sein Auge für das Bild, welches die Augenmedien vom Hintergrunde des Auges entwerfen, nicht akkommodieren kann. Zu dem Ende müssen noch passende Glaslinsen hinzugenommen werden. Die Zusammenstellung eines Beleuchtungsapparates mit solchen Glaslinsen gibt ein Instrument, Augenspiegel, mittels dessen man die Bilder auf der Netzhaut und die Teile der Netzhaut eines fremden Auges deutlich sehen und untersuchen kann.

Brücke hat auf einen eigentümlichen Nutzen aufmerksam gemacht, den die Schicht der stabförmigen Körperchen bei der Zurückwerfung des Lichts an der Netzhaut haben muß. Diese Körperchen sind kleine Zylinder, 0,030 mm lang, 0,0018 mm dick, von einer stark lichtbrechenden Substanz gebildet, welche palissadenartig dicht nebeneinander gedrängt die der Aderhaut zugekehrte letzte Schicht der Netzhaut bilden. Die Achse derer, welche im Hintergrunde des Auges die Netzhaut bedecken, ist gegen die Pupille hin gerichtet, und alles einfallende Licht tritt deshalb in diese Körperchen nahehin ihrer Achse parallel

ein. Da nun Licht, welches innerhalb eines dichteren Mittels fortschreitend unter einem sehr großen Einfallswinkel auf die Grenze eines weniger lichtbrechenden Mediums trifft, total reflektiert wird, so können wir schließen, daß das Licht, welches in ein stabförmiges Körperchen einmal eingetreten ist, dieses meist nicht wieder verläßt, sondern, wenn es irgendwo auf die zylindrische Begrenzungsfläche des Körperchens treffen sollte, hier größtenteils nach innen reflektiert wird. Wenn wir die Brechkraft der stabförmigen Körperchen beispielsweise gleich der des Öls (1,47), die ihrer Zwischensubstanz gleich der des Wassers setzen (1,33), so werden Strahlen, die unter einem Winkel kleiner als 25° gegen ihre Fläche fallen, total reflektiert, während die von der Pupille etwa nur unter einem Winkel von 8° auffallen. Ist das Licht endlich an dem äußeren Ende des Körperchens angekommen, und wird hier ein Teil von der Aderhaut diffus zurückgeworfen, so wird dieser wieder hauptsächlich durch dasselbe Körperchen zurückkehren müssen. Was von dem Lichte dann unter einem größeren Winkel gegen die Achse des Körperchens verläuft, wird allerdings das Körperchen auch verlassen können, aber nur nach oft wiederholten Reflexionen an den Grenzen der nächsten Körperchen bis in den Glaskörper dringen können. Solches Licht dagegen, welches nahe parallel der Achse der Körperchen zurückgeht, wird nur eine oder wenige totale Reflexionen erleiden, daher wenig geschwächt sein, wenn es das Körperchen verläßt, dann aber auch die Richtung nach der Pupille haben und durch diese austreten. Diese Funktion der Körperchen scheint namentlich bei denjenigen Tieren, welche statt der Schicht schwarzer Pigmentzellen auf der Aderhaut eine stark reflektierende Fläche (Tapetum) haben, von Wichtigkeit zu sein. Einmal wird dadurch bewirkt, daß das Licht die empfindenden Netzhautelemente, welche es beim Einfallen getroffen hatte, bei seiner Rückkehr noch einmal trifft und erregt. Zweitens kann es rückkehrend nur dieselben oder höchstens teilweise die nächsten Netzhautelemente treffen, und sich nur zu einem kleinen Teile im Auge diffus zerstreuen, was die Genauigkeit des Sehens erheblich beeinträchtigen würde. Daß solches diffus zerstreutes Licht bei hinreichend hellen Netzhautbildern im Gesichtsfelde merkbar werden kann, zeigt die im vorigen Paragraphen beschriebene Beobachtungsweise der Aderfigur mittels eines unter dem Auge hin und her bewegten Lichts.

Ich lasse nun hier eine Reihe allgemeiner Sätze zur Begründung der mathematischen Theorie des Augenleuchtens und der Augenspiegel folgen, durch deren Aufstellung die Betrachtung der einzelnen Fälle später außerordentlich vereinfacht wird.

Satz I.

Wenn zwei Lichtstrahlen in entgegengesetzter Richtung durch beliebig viele einfach brechende Mittel gehen, und in einem dieser Medien in eine gerade Linie zusammenfallen, so fallen sie in allen zusammen.

Es sei AB Fig. 99 der Teil der beiden Strahlen, von dem wir wissen, daß er beiden gemeinschaftlich angehöre. Der erste Strahl sei von E längs der Linie EB gekommen, in B gebrochen und nach A gegangen. Der zweite Strahl kommt von A längs der Linie AB nach B, wird hier gebrochen, und gehe nach $E_{,}$. Zunächst ist zu beweisen, daß $E_{,}B$ mit EB zusammenfällt. DBC sei das Einfallslot, m das Brechungsverhältnis des Mittels, in welchem E und $E_{,}$, der

Winkel $EBD = \alpha$ und der Winkel $E_{,}BD = \alpha_{,}$ liegen; n dagegen das Brechungsverhältnis des Mittels, in welchem A und der Winkel $ABC = \beta$ liegt. Für den ersten Strahl muß nach dem Brechungsgesetz AB in der durch DB und EB gelegten Ebene liegen, und ferner sein

$$m \sin \alpha = n \sin \beta.$$

Ebenso muß für den zweiten Strahl $E_{,}B$ in der durch DB und AB gelegten Ebene liegen, also in derselben, in welcher auch EB liegt, und es muß sein

$$m \sin \alpha_{,} = n \sin \beta.$$

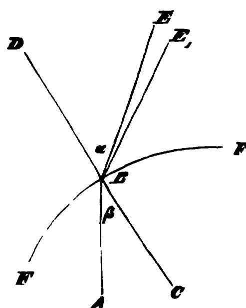


Fig. 99.

Daraus folgt

$$\sin \alpha = \sin \alpha_{,} \text{ oder}$$

$$\alpha = \alpha_{,},$$

da beide Winkel nur im ersten Quadranten liegen können.

Daraus folgt, daß $E_{,}B$ mit EB zusammenfällt. Somit kongruieren die beiden Strahlen auch in dem Mittel, in welchem E liegt, soweit dieses reicht.

Bei der nächsten brechenden Fläche läßt sich ihre Kongruenz dann wieder für das dritte Medium folgern usw.

Zusätze. 1. Auch sieht man leicht ein, daß bei Reflexionen an spiegelnden Flächen die Kongruenz nicht gestört wird.

2. Für das Auge folgt, daß ein Strahl, der auf seinem Wege von der Netzhaut zur Linse mit einem anderen zusammenfällt, der von einem leuchtenden Punkte in das Auge und auf die Netzhaut fällt, auch außerhalb des Auges mit diesem kongruiert.

3. Stellt man den Satz so allgemein hin, wie es hier geschehen ist, so muß man daran denken, daß bei gewissen Polarisationsrichtungen und Einfallswinkeln die Strahlen bei einer Brechung oder Reflexion ganz verlöschen könnten. Bei unseren Anwendungen auf die Beleuchtung des Auges treten solche Umstände nicht ein. Das Licht fällt auf die brechenden Flächen des Auges fast senkrecht ein, wobei seine etwa vorhandene Polarisation so gut wie keinen Einfluß auf die Stärke des gebrochenen und reflektierten Anteils hat. Übrigens können wir die Schwächung der Strahlen durch Reflexion und Absorption an und in den Augenmedien vernachlässigen. Nur wenn man schräg gestellte Glasplatten als Reflektor benutzt, muß man an die Schwächung des Lichts durch Reflexion denken.

Für die Intensität des hin und zurück gehenden Lichtstrahls läßt sich übrigens ebenfalls eine ganz entsprechende Regel von sehr ausgedehnter Gültigkeit aufstellen, die ausgesprochen zu haben hier genügen mag, da wir bei gegenwärtiger Anwendung das Prinzip in seiner allgemeineren Form nicht brauchen. Den Beweis kann sich übrigens jeder, der die Gesetze der Optik kennt, leicht selbst führen. Man kann diese allgemeinere Regel folgendermaßen aussprechen.

Ein Lichtstrahl gelange von dem Punkte A nach beliebig vielen Brechungen, Reflexionen usw. nach dem Punkte B. In A lege man durch seine Richtung zwei beliebige, aufeinander senkrechte Ebenen a_1 und a_2, nach welchen seine Schwingungen zerlegt gedacht werden. Zwei eben solche Ebenen b_1 und b_2 werden durch den Strahl in B gelegt. Alsdann läßt sich folgendes beweisen: Wenn die Quantität J nach der Ebene a_1 polarisierten Lichts von A in der Richtung des besprochenen Strahls ausgeht, und davon die Quantität K nach der Ebene b_1 polarisierten Lichts in B ankommt, so wird rückwärts, wenn die Quantität J nach b_1 polarisierten Lichts von B ausgeht, dieselbe Quantität K nach a_1 polarisierten Lichts in A ankommen.

Soviel ich sehe, kann hierbei das Licht auf seinem Wege der einfachen und doppelten Brechung, Reflexion, Absorption, gewöhnlichen Dispersion und Diffraktion unterworfen sein, ohne daß das Gesetz seine Anwendbarkeit verliert, nur darf keine Änderung seiner Brechbarkeit stattfinden, und es darf nicht durch Körper gehen, in denen der Magnetismus nach FARADAYS Entdeckung auf die Lage der Polarisationsebene einwirkt.

Satz II.

Wenn die Pupille des beobachteten Auges leuchtend erscheinen soll, so muß sich auf seiner Netzhaut das Bild der Lichtquelle ganz oder teilweise mit dem Bilde der Pupille des Beobachters decken.

Wenn von irgend einer Stelle der Netzhaut des beobachteten Auges Licht in das Auge des Beobachters dringen soll, so muß diese Stelle erstens von der Lichtquelle erleuchtet sein, also dem Bilde der Lichtquelle angehören. Zweitens, wenn wir die Fiktion machen, daß Licht von der Pupille des Beobachters ausgeht, so müßte nach dem vorigen Satze ebensogut Licht von der Pupille des Beobachters zur betreffenden Stelle der Netzhaut des beobachteten Auges wie umgekehrt gehen können. Die Netzhautstelle muß also gleichzeitig dem Netzhautbilde der Pupille des Beobachters angehören, mag dieses Bild nun scharf oder ein Zerstreuungsbild sein.

Zusätze. 1. Dieser Satz gilt nicht nur für den Fall, wo die Strahlen auf geradem Wege von der Lichtquelle zum beobachteten Auge und von diesem zum Auge des Beobachters gehen, sondern auch wenn beliebig viele Linsen und Spiegel dazwischen geschoben sind. Dadurch erhält man ein bequemes Mittel, sich experimentell die Wirkung jedes Augenspiegels am eigenen Auge deutlich zu machen. Man stelle das zur Erleuchtung dienende Licht auf und bringe das Instrument vor sein Auge in dieselbe Lage, wie es sonst vor dem Auge des Beobachteten steht; der Teil des Gesichtsfeldes, welcher alsdann hell erscheint, entspricht dem Teile der Netzhaut, welcher beleuchtet ist. Man kann erkennen, ob das helle Feld groß oder klein, ob es gleichmäßig erleuchtet ist, oder ob sich dunkle Stellen darin befinden, und wie dunkel diese sind. Alsdann nehme man die Flamme von der Stelle weg, wo sie zur Erleuchtung des Auges dient, und bringe sie hinter das Instrument, da wo sich sonst das Auge des Beobachters befindet, so daß das Licht durch die Öffnung scheint, welche dem Beobachter zum Durchsehen dient. Was jetzt im Gesichtsfelde erleuchtet ist, ist der Kreis, den der Beobachter von der Netzhaut übersehen kann.

Ich empfehle diesen Weg, um bei den verschiedenen Kombinationen ebener und gekrümmter Spiegel, konvexer und konkaver Linsen in den Augenspiegeln sich die Wirkungen klar zu machen, ohne daß man sich auf verwickelte geometrische Konstruktionen einzulassen braucht, die den Ungeübten leicht mehr verwirren als aufklären.

2. Was die Wirkung der in diesem Paragraphen beschriebenen Beleuchtungsweisen betrifft, so ordnet sich deren Wirkung leicht unter die hier aufgestellte Regel. Man erinnere sich daran, daß, wie die tägliche Erfahrung lehrt und eine einfache Konstruktion des Ganges der Lichtstrahlen bestätigt, das Zerstreuungsbild eines fernen Gegenstandes nicht das scharfe Bild eines deutlich gesehenen näheren Gegenstandes bedecken kann, wohl aber das Zerstreuungsbild eines näheren Gegenstandes das scharfe Bild eines ferneren. Bei dem Versuche mit dem durchbohrten Spiegel bedeckt das Zerstreuungsbild der Öffnung, durch welche der Beobachter blickt und welche sich möglichst nahe vor dem beobachteten Auge befinden muß, das entferntere, vielleicht deutlich gesehene Bild der Lichtflamme. Wenn man keinen Spiegel anwendet, sondern der Beobachter dicht an der Flamme vorbei nach dem beobachteten Auge sieht, erscheinen diesem Auge die Flamme und das Auge des Beobachters nahe nebeneinander, und sobald das beobachtete Auge nicht scharf für sie akkommodiert ist, fließen ihre

Zerstreuungskreise ineinander. Bei der Beleuchtung mit einer unbelegten Glasplatte können beide Bilder scharf sein, sowohl das des Lichts, wie das der Pupille des Beobachters. Ersteres wird von der Platte gespiegelt, letzteres durch die Platte gesehen, so daß beide aufeinanderfallen. Der Beobachtete kann deshalb selbst am leichtesten die Glasplatte so stellen, daß dem Beobachter sein Auge leuchtend erscheint. Er muß nur darauf achten, daß ihm das Auge des Beobachters von dem Spiegelbilde der Flamme gedeckt erscheine.

Ein solches Reziprozitätsgesetz, wie wir es eben dafür aufgestellt haben, daß überhaupt Licht von einem leuchtenden zu einem zu beleuchtenden Punkte hin und her gehe, läßt sich auch für die Quantität des hin und zurück gelangenden Lichts aufstellen. Wir erinnern in dieser Beziehung zunächst an folgendes.

Allgemeines Gesetz der Beleuchtung.

Wenn sich in einem durchsichtigen Medium zwei verschwindend kleine Flächenelemente von der Größe a und b in der gegenseitigen Entfernung r befinden, ihre Normalen mit der sie verbindenden geraden Linie beziehlich die Winkel α und β bilden, und a mit der Helligkeit H Licht aussendet, so ist die Lichtmenge L, welche von a auf b fällt

$$L = \frac{H \cdot a\,b \cos\alpha \cos\beta}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1).$$

Ebenso groß ist auch die Lichtmenge, welche von b auf a fallen würde, wenn b mit der Helligkeit H Licht aussendete.

Satz III.

In einem zentrierten Systeme von brechenden Kugelflächen sei n_1 das Brechungsverhältnis des ersten, n_2 das des letzten brechenden Mittels. In dem ersten befinde sich senkrecht gegen die Achse des Systems gerichtet und der Achse nahe ein Flächenelement α, in dem letzten ein eben solches β. Wenn α die Helligkeit $n_1{}^2 H$ hat und β die Helligkeit $n_2{}^2 H$, so fällt ebensoviel Licht von α auf β wie von β auf α.

Um den Beweis nicht komplizierter zu machen, als unsere beabsichtigten Anwendungen verlangen, vernachlässigen wir dabei die Schwächungen, welche die Strahlen an den brechenden Flächen durch Reflexion erleiden, und nehmen an, daß die Einfallswinkel der Strahlen an den brechenden Flächen immer klein genug sind, um ihre Kosinus gleich 1 setzen zu können, obgleich der Satz sich auch in allgemeinerer Form beweisen läßt.

1. Wenn β nicht am Orte des Bildes von α liegt.

Es sei AC die optische Achse des brechenden Systems, F sein erster, G sein zweiter Hauptpunkt, α das erste Flächenelement, welches wir, da es verschwindend klein sein soll, nur durch einen Punkt in der Zeichnung dargestellt haben, γ sein Bild, $f_1 f_2$ der Durchschnitt des einfallenden Strahlenbündels in der ersten Hauptebene, $g_1 g_2$ derselbe in der zweiten. Die Grundfläche des Strahlenbündels in der ersten Hauptebene ist kongruent derselben in der

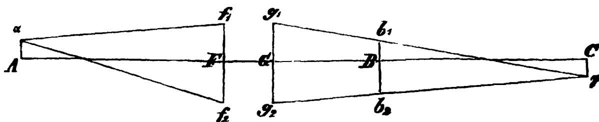


Fig. 100.

zweiten; ihre gemeinsame Größe sei Φ. Das zweite Flächenelement β liege in der Ebene, welche in B senkrecht gegen die optische Achse steht, und $b_1 b_2$ sei der Durchschnitt des Strahlenbündels in dieser Ebene. Die Fußpunkte der von α und γ auf die optische Achse gefällten Lote seien A und C.

Die Lichtmenge, welche von α auf die Grundfläche des Strahlenkegels $f_1 f_2$ fällt, ist nach Gleichung 1) gleich

$$\frac{n_1{}^2 H \cdot \alpha \cdot \Phi}{A F^2},$$

wenn $n_1{}^2 H$ die Helligkeit von α ist. Dieselbe Lichtmenge fällt auch auf die weiteren Querschnitte des Strahlenkegels in $g_1 g_2$ und $b_1 b_2$. Die Lichtmenge nun, welche in der letzteren Ebene auf das Flächenelement β fällt, verhält sich zu der ganzen Lichtmenge, welche die Fläche $b_1 b_2$ trifft, wie die Oberfläche von β zu dem Querschnitt des Strahlenkegels in $b_1 b_2$, den wir mit Ξ bezeichnen wollen. Es ist also die ganze Lichtmenge X, welche von α auf β fällt, gleich

$$X = \frac{\Phi}{\Xi} \cdot \frac{n_1{}^2 H \alpha \beta}{A F^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2).$$

Nun ist aber ferner

$$\frac{\Phi}{\Xi} = \frac{(g_1 g_2)^2}{(b_1 b_2)^2} = \frac{C G^2}{B C^2}.$$

Dieser Wert, in die Gleichung 2) gesetzt, gibt

$$X = n_1{}^2 H \alpha \beta \frac{C G^2}{B C^2 \cdot A F^2}.$$

Da nun nach § 9 Gleichung 8a)

$$\frac{G C}{A F} = \frac{F_2}{A F - F_1},$$

wo F_1 und F_2 die beiden Brennweiten des Systems sind, so ist

$$X = H \alpha \beta \cdot \frac{n_1{}^2 F_2{}^2}{[A F \cdot F_2 + B G \cdot F_1 - A F \cdot B G]^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 2a).$$

Ebenso bekommt man nun für die Lichtmenge Y, welche von β, wenn es mit der Helligkeit $n_2{}^2 H$ leuchtet, auf α fällt, den Ausdruck

$$Y = H \alpha \beta \cdot \frac{n_2{}^2 F_1{}^2}{[A F \cdot F_2 + B G \cdot F_1 - A F \cdot B G]^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 2b).$$

Da auf beiden Seiten alles symmetrisch ist, braucht man, um dies zu erhalten, in dem Ausdrucke für X nur zu vertauschen

$A F$ mit $B G$
F_1 mit F_2
α mit β
$n_1{}^2 H$ mit $n_2{}^2 H$.

Da nun nach § 9 Gleichung 9c)

$$n_1 F_2 = n_2 F_1,$$

so folgt aus 2a) und 2b)

$$X = Y,$$

was zu beweisen war.

2. Wenn β an den Ort des Bildes von α fällt.

Wir nehmen zuerst an, daß β in Größe und Lage dem Bilde von α genau entspreche, dann entspricht auch α genau dem Bilde von β. Alles Licht also, was von α aus durch die brechenden Flächen dringt, fällt auf β, umgekehrt, alles, was von β durch die brechenden Flächen dringt, fällt auf α.

Wir behalten die Bezeichnungen der Figur 96 bei, nur daß wir uns das Element β jetzt in γ liegend denken.

Es ist die von α bei der Helligkeit $n_1^2 H$ auf die brechenden Flächen und also auch auf β fallende Lichtmenge X

$$X = n_1^2 H \frac{\alpha \Phi}{A F^2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 3a),$$

und die von β bei der Helligkeit $n_2^2 H$ auf die brechenden Flächen und also auch auf α fallende Menge Y

$$Y = n_2^2 H \frac{\beta \Phi}{G C^2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 3b).$$

Da nun β das Bild von α sein soll, so ist nach § 9 Gleichung 8b), indem man berücksichtigt, daß α und β ähnliche Flächen, also dem Quadrate ihrer entsprechenden Lineardimensionen proportional sind

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{F_2^2}{(G C - F_2)^2},$$

und da ferner nach § 9 Gleichung 8a)

$$G C - F_2 = \frac{G C \cdot F_1}{A F},$$

so folgt

$$\frac{\alpha F_1^2}{A F^2} = \frac{\beta F_2^2}{G C^2},$$

und da $F_1 : F_2 = n_1 : n_2$, so folgt

$$\frac{\alpha n_1^2}{A F^2} = \frac{\beta n_2^2}{G C^2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 3c).$$

Aus 3a), 3b) und 3c) zusammen folgt endlich

$$X = Y,$$

was zu beweisen war.

Sollte eines der beiden Elemente, z. B. α, größer sein als das Bild von β, so würden die Teile von α, welche nicht zum Bilde von β gehören, weder Licht auf β werfen, noch von β empfangen können, es würde dadurch also weder X noch Y geändert werden und unser Satz richtig bleiben.

Zusätze. 1. Die ganze Beweisführung läßt sich ebensogut auf zentrierte Systeme brechender und spiegelnder Kugelflächen anwenden.

2. Die leuchtende und beleuchtete Fläche brauchen auch nicht verschwindend klein zu sein, wenn sie nur klein genug sind, daß die Kosinus der Einfallswinkel der Strahlen an den brechenden Flächen sich nicht merklich von 1 unterscheiden. Denn da für jedes Paar verschwindend kleiner Flächenelemente der beiden Flächen der Satz gilt, so gilt er auch für die ganzen Flächen.

Wenn wir den eben bewiesenen Satz auf die Verhältnisse des Augenleuchtens anwenden und das eine Flächenelement in die Netzhaut des beobachteten Auges verlegen, statt des anderen die Pupille des Beobachters setzen, übrigens den

Unterschied der Brechung zwischen wässriger und gläserner Feuchtigkeit vernachlässigen und zwischen den beiden Augen ein beliebiges System zentrierter brechender oder spiegelnder kugeliger Flächen angebracht denken, so können wir den Satz folgendermaßen aussprechen:

Satz IIIa.

Die Menge Licht, welche von einem Flächenelemente der Netzhaut des beobachteten Auges in das Auge des Beobachters fällt, ist gleich der Helligkeit, mit der das Netzhautelement von der Lichtquelle erleuchtet wird, multipliziert mit der Menge Licht, welche von der Pupille des Beobachters, wenn sie die Helligkeit = 1 hätte, auf das Netzhautelement fallen würde.

H sei die Helligkeit, mit der das Netzhautelement von der Lichtquelle erleuchtet wird, und k die Lichtmenge, welche von der Pupille des Beobachters, wenn diese mit der Helligkeit 1 leuchtet, auf das Netzhautelement fällt, so würde nach dem eben bewiesenen Satze k auch gleich der Lichtmenge sein, welche von dem Netzhautelemente, wenn dieses die Helligkeit 1 hätte, in die Pupille des Beobachters gelangte. Da dieses nun aber die Helligkeit H hat, so ist die Lichtmenge, welche von diesem Elemente wirklich in die Pupille des Beobachters gelangt, Hk, wie es unser Satz ausspricht.

Es ist dieser Satz gleichsam die weitere Ausführung des Satzes II, indem hier die quantitativen Bestimmungen gegeben werden, welche dort fehlten. Zunächst ist er nur erwiesen für Augenspiegel, an deren brechenden und spiegelnden Flächen die Lichtstrahlen nahe senkrecht einfallen und keinen erheblichen Verlust erleiden. Es ist aber leicht einzusehen, daß er auch für die Beleuchtung des Auges mit schief gestellten spiegelnden Glasplatten gilt, da unpolarisiertes Licht, vom beobachtenden zum beobachteten Auge durch eine solche Platte gehend, ebenso stark geschwächt wird, als wenn es den umgekehrten Weg verfolgte.

Satz IV.

Wenn ein Beobachter durch ein zentriertes System brechender und spiegelnder Kugelflächen ein scharfes Bild eines leuchtenden Gegenstandes erblickt und wir den Verlust von Licht an den brechenden und spiegelnden Flächen vernachlässigen können, so erscheint jede Stelle des Bildes dem Beobachter ebenso hell, wie ihm die entsprechende Stelle des Gegenstandes ohne optische Instrumente gesehen erscheinen würde, so oft die ganze Pupille des Beobachters von den Strahlen getroffen wird, die von einem einzelnen Punkte jener Stelle ausgehen. Ist diese letztere Bedingung nicht erfüllt, so verhält sich die Helligkeit des optischen Bildes zur Helligkeit des frei gesehenen Gegenstandes, wie der von Strahlen eines leuchtenden Punktes getroffene Flächenraum der Pupille des Beobachters zur ganzen Pupille.

Wenn das Auge direkt oder durch ein zentriertes optisches System ein deutliches Bild eines Gegenstandes sieht, so können wir das Auge mit dem vorgesetzten optischen Systeme zusammen wiederum als ein optisches System betrachten, welches ein Bild des Gegenstandes auf der Netzhaut entwirft. Es sei

a ein Flächenelement des Gegenstandes, *b* sein Bild auf der Netzhaut. So viel Licht von *a* nach *b* geht, würde auch nach Satz III dieses Paragraphen von *b* nach *a* gehen, wenn dem Netzhautelemente *b* die Helligkeit $\frac{(n_2)^2}{(n_1)^2} H$ erteilt würde. In diesem Ausdrucke ist H die Helligkeit des Elements a, n_1 das Brechungsverhältnis des Mediums, in dem sich a befindet, n_2 das des Glaskörpers. Es läßt sich aber leicht berechnen, wie viel Licht von b nach a unter diesen Umständen gehen würde. Ist q der Querschnitt des von einem Punkte von b nach einem Punkte von a gehenden Strahlenbündels in der Pupille, so ist die von b nach a gehende Lichtmenge M gleich der von b nach q gehenden, und diese ist

$$M = \frac{n_2^{\,2}}{n_1^{\,2}} H \cdot \frac{q\,b}{R^2},$$

worin R den Abstand der Pupille von der Netzhaut bedeutet. Streng genommen würde hier unter q der Querschnitt des Strahlenbündels in dem von der Linse entworfenen Bilde der Pupille, und unter R die Entfernung dieses Bildes von der Netzhaut zu verstehen sein. In diesem Ausdrucke für die Lichtmenge, welche von dem leuchtenden Flächenelemente H in das Auge fällt, sind zwei Größen, welche von der Beschaffenheit des dem Auge vorgesetzten optischen Systems abhängen, nämlich q der Querschnitt des Strahlenbündels in der Pupille und b die Größe des Bildes auf der Netzhaut.

Die Helligkeit dieses Bildchens hängt nun aber nicht nur von der einfallenden Lichtmenge ab, sondern auch von der Größe der Fläche b, über welche die Lichtmenge ausgebreitet wird, und ist der letzteren umgekehrt proportional. Setzen wir als Einheit der Beleuchtungsstärke die Lichtmenge, welche die Einheit der Fläche trifft, so ist die Beleuchtungsstärke J des Netzhautelements b

$$J = \frac{M}{b} = \frac{n_2^{\,2}}{n_1^{\,2}} H \cdot \frac{q}{R^2},$$

in welchem Ausdrucke nur noch q von der Beschaffenheit des optischen Systems abhängig ist. Sieht das Auge frei den Gegenstand an, so füllt das Strahlenbündel die ganze Pupille, deren Querschnitt Q sei, und die Beleuchtungsstärke wird

$$J = \frac{n_2^{\,2}}{n_1^{\,2}} H \cdot \frac{Q}{R^2}.$$

Größer als Q kann q niemals werden; dieser letztere Ausdruck ist also das Maximum der Helligkeit; er stellt die natürliche Helligkeit des Bildes dar. Die Helligkeit ausgedehnter Flächen kann durch optische Instrumente nie größer, nur kleiner werden, wenn q kleiner als Q, und verhält sich dann zur natürlichen Helligkeit wie q zu Q.

Zusätze. 1. Nur wenn wir verschwindend kleine leuchtende Punkte durch optische Instrumente betrachten, deren Bild auch bei den stärksten Vergrößerungen nur die Ausdehnung der kleinsten Zerstreuungskreise auf der Netzhaut bedeckt, also immer dieselbe Flächenausdehnung behält, können optische Instrumente die Helligkeit vergrößern. Dies geschieht z. B. für die Fixsterne, und deshalb können auch Fixsterne durch stark vergrößernde Fernröhre mit großen Aperturen bei Tage sichtbar gemacht werden. Die scheinbare Helligkeit des Fixsterns steigt proportional der Lichtmenge, welche das Instrument in seinen Fokus vereinigt, während die Helligkeit des Himmelsgewölbes im Fernrohre nicht vermehrt wird.

2. Auch wenn Zerstreuungsbilder einer leuchtenden Fläche von gleichmäßiger Helligkeit im Auge entworfen werden, kann die Helligkeit des Netzhautbildes nur gleich, nie größer werden als die Helligkeit bei freier Betrachtung der Fläche. Der Beweis läßt sich ganz so führen wie für scharf gesehene Bilder, da Satz III für scharfe Bilder und für Zerstreuungsbilder gleichmäßig gilt. Auch hier ist die Helligkeit proportional dem Querschnitt des Strahlenbündels in der Pupille, welches von dem entsprechenden Punkte der Netzhaut bis nach der leuchtenden Fläche gelangen kann.

Ich erlaube mir zu bemerken, daß gegen die hier entwickelten Grundsätze der Helligkeit dioptrischer und katoptrischer Apparate noch oft gesündigt wird. Man glaubt noch oft, daß, wenn man Licht durch Sammellinsen oder Hohlspiegel in das Auge, in Mikroskope usw. fallen läßt, man dadurch nicht bloß die scheinbare Größe der leuchtenden Fläche, sondern auch ihre scheinbare Helligkeit vermehren könne. Der Vermehrung des in das Auge fallenden Lichts, welches durch solche Mittel erreicht werden kann, entspricht stets eine entsprechende Vergrößerung des Bildes, so daß das Bild eben nur größer, nicht heller wird. Durch kein optisches Instrument kann man die Helligkeit einer leuchtenden Fläche von erkennbaren Dimensionen für das Auge größer machen, als sie dem bloßen Auge erscheint. Ebensowenig kann eine beleuchtete Fläche jemals eine größere Helligkeit bekommen, als die leuchtende hat.

Satz V.

Allgemeines Verfahren, die Helligkeit zu bestimmen, mit welcher dem Beobachter durch einen Augenspiegel eine Stelle der Netzhaut des beobachteten Auges erscheint.

a) Wenn der Verlust, den die einzelnen Strahlen an den brechenden und reflektierenden Flächen erleiden, vernachlässigt werden kann. Es sei x ein Punkt an der betreffenden Stelle der Netzhaut; wir haben zu untersuchen, wie das Strahlenbündel verläuft, welches von x nach der Pupille desselben Auges geht. Nach Satz I und II muß ein Teil dieses Strahlenbündels zum leuchtenden Körper, ein anderer zur Pupille des Beobachters gehen. Es sei P der Querschnitt der Pupille des beobachteten Auges, p in dieser Pupille der Querschnitt desjenigen Teils des Strahlenbündels, welches zum leuchtenden Körper zurückgelangt, H die Helligkeit, welche der betreffenden Netzhautstelle zukommen würde, wenn das beobachtete Auge, frei nach dem leuchtenden Körper blickend, auf ihr ein Bild dieses Körpers entwürfe. Wir können diese die normale Helligkeit nennen. Sie hängt natürlich wesentlich von der Struktur der Netzhaut selbst ab, ferner von der Helligkeit des leuchtenden Körpers und der Weite der Pupille P. Bei Anwendung des Augenspiegels muß notwendig die wirkliche Helligkeit der Netzhautstelle kleiner werden, nämlich

$$\frac{p}{P} H.$$

Weiter ermittele man den Querschnitt q, den der Teil des von x ausgegangenen Strahlenbündels, welcher in die Pupille des Beobachters gelangt, in dieser Pupille hat, deren ganzer Flächeninhalt Q sei, so ergibt sich schließlich für die Helligkeit der Netzhautstelle, wie sie dem Beobachter erscheint,

$$\frac{q \cdot p}{Q \cdot P} H.$$

b) Wenn die Strahlen durch Spiegelung oder Brechung einen merklichen Verlust erleiden. Unter den bisher konstruierten Formen der

Augenspiegel kommt ein solcher nur bei dem von mir angegebenen mit unbelegten spiegelnden Platten vor. Das vom Auge zum leuchtenden Körper gehende Strahlenbündel wird in diesem Falle und allen ähnlichen ebensoviel verlieren als die vom Lichte wirklich zum Auge gehenden Strahlen. Man braucht also auch nur den Verlust des ersteren zu berechnen. Es möge von einem Strahl, der vom Licht zum beobachteten Auge geht und dessen Intensität 1 ist, α im Auge ankommen, und von einem eben solchen Strahle, der vom beobachteten Auge ausgeht, β in dem des Beobachters ankommen, dann müssen wir den obigen Ausdruck für die Helligkeit noch mit α und β multiplizieren; er wird also

$$\frac{\alpha \cdot \beta \cdot p \cdot q}{P \cdot Q} H.$$

Durch die in den vorstehenden Sätzen vollzogene Umkehr des Problems von der Erleuchtung des Auges haben wir die Untersuchung der Helligkeit der Bilder für jeden Fall auf die Bestimmung des Ganges eines einzigen Strahlenbündels reduziert, während es sonst nötig war, die Helligkeit einer einzelnen Netzhautstelle aus der Helligkeit aller übereinander gelagerten Zerstreuungskreise, welche den einzelnen Punkten der Lichtquelle entsprechen, durch Summation zu bestimmen. Auch glaube ich, daß die Sache dadurch der Anschauung zugänglicher wird. Den Gang der Strahlen von einem Netzhautpunkte durch die verhältnismäßig einfachen optischen Systeme der Augenspiegel, von denen eines zur Beleuchtung, eines zur Beobachtung dient, einzeln genommen kann man sich leicht veranschaulichen, während die ganze Übersicht des Ganges der Lichtstrahlen von der Lichtquelle bis zum Auge des Beobachters meist deshalb schwierig wird, weil auf der Netzhaut eine unendliche Zahl ineinander greifender Zerstreuungskreise der Punkte der Lichtquelle und der Pupille des Beobachters entstehen.

Satz VI.

Die Mittel, ein deutliches Bild des Augenhintergrundes zu erhalten.

A Fig. 101 sei das beobachtete Auge, *a* ein Punkt seiner Netzhaut, dessen Bild von den Augenmedien in *b* entworfen wird, in der Entfernung, wo das

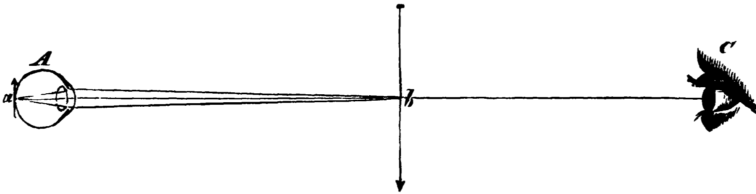


Fig. 101.

beobachtete Auge deutlich sieht. Die beiden Pfeile, welche bei *a* und *b* gezeichnet sind, entsprechen der Größe der zusammengehörigen Bilder. Das Bild der Netzhautstelle ist vergrößert und umgekehrt. Ein Beobachter, welcher ohne weitere Hilfsmittel dies Bild der Netzhaut in *b* sehen wollte, müßte also noch weiter entfernt vom Auge *A*, etwa in *C* sich befinden, so daß die Entfernung *Cb* wieder gleich der Sehweite des Beobachters würde. Hierbei würde aber das von der Pupille des beobachteten Auges begrenzte Gesichtsfeld des Beobachters so klein sein, daß er doch nichts erkennen könnte.

Es sind bisher zwei Hauptmethoden angewendet worden, um die Lage des Bildes *b* dem Beobachter bequemer zu machen. Bei der einen wird ein virtuelles

aufrechtes Bild der Netzhaut, bei der anderen ein reelles umgekehrtes entworfen.

A. Darstellung der Netzhaut im virtuellen aufrechten Bilde.

Man wendet dazu eine Konkavlinse B in Fig. 102 an, deren Brennweite Bp kleiner ist als die Entfernung des Punktes b von ihr. Eine solche macht die von A nach b hin konvergierenden Lichtstrahlen wieder divergent, so daß sie von einem scheinbar bei d im Rücken des beobachteten Auges gelegenen Punkte zu kommen scheinen. Die Pfeile bezeichnen wieder Lage und Größe der Netzhautstelle und ihrer Bilder.

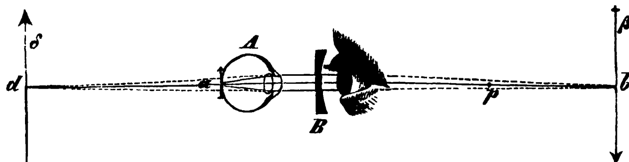


Fig. 102.

Nennen wir p die negative Brennweite der Konkavlinse, α die Entfernung Bb, γ die Entfernung dB, so ist

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{p};$$

γ muß gleich der Sehweite des Beobachters sein, wenn er das bei d entworfene Bild der Netzhaut deutlich sehen soll; α hängt von der Akkommodationsweite Ab des beobachteten Auges und der Entfernung A und B ab. Hat man den Wert beider Größen festgestellt, so kann man aus der gegebenen Gleichung den Wert von p berechnen, welcher gewählt werden muß, um deutliche Bilder zu geben.

Wären beide Augen für unendliche Ferne akkommodiert, also $\alpha = \gamma = \infty$, so würde auch $p = \infty$ werden müssen, d. h. es wäre gar keine Linse notwendig.

Auch für die seitlich gelegenen Teile der Netzhaut ist gewöhnlich keine Linse notwendig, weil diese vor den dorthin fallenden Vereinigungspunkten der Lichtstrahlen weit entfernter Lichtpunkte zu liegen scheinen, und die Augenmedien von ihnen daher selbst schon ein dem Beobachter passendes Bild entwerfen.

Das Netzhautbild in d ist bei dieser Beobachtungsweise aufrecht.

Was die Vergrößerung betrifft, so denke man in b einen leuchtenden Gegenstand, dessen Bild auf der Netzhaut in a entworfen werden würde. Die rückkehrenden Strahlen bilden ein Bild des Netzhautbildes, welches nach den vorher auseinandergesetzten Grundsätzen des Augenleuchtens dem leuchtenden Gegenstande in b kongruent ist. Nennt man β die Größe des leuchtenden Gegenstandes und des ihm gleichen Bildes in b, δ die des vom Beobachter gesehenen Bildes in d, so ist

$$\frac{\beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\gamma}.$$

Als Maß für die scheinbare Größe des gesehenen Bildes können wir seine Größe dividiert durch seine Entfernung von dem sehenden Auge gebrauchen. Befindet sich das Auge des Beobachters dicht hinter dem Konkavglase, so wäre die scheinbare Größe des Bildes

$$\frac{\delta}{\gamma} = \frac{\beta}{\alpha}.$$

Nennen wir die Entfernung AB nun q, so ist die scheinbare Größe des Objekts b für das Auge a

$$\frac{\beta}{\alpha + q},$$

also etwas kleiner als die des Bildes δ für den Beobachter. Ist die Sehweite des Auges A sehr viel größer als q, so kann man q gegen α vernachlässigen, und findet auch für das beobachtete Auge die scheinbare Größe des leuchtenden Gegenstandes gleich $\frac{\beta}{\alpha}$.

Die Netzhautbilder des beobachteten Auges erscheinen also bei dieser Anordnung dem Beobachter unter gleichem oder etwas größerem Gesichtswinkel als die entsprechenden Gegenstände dem beobachteten Auge.

Daraus ergibt sich nun leicht die Vergrößerung der Netzhautstelle des beobachteten Auges. Ist x die Größe des auf der Netzhaut in a entworfenen Bildes von β, und y der Abstand der Netzhaut vom hinteren Knotenpunkte des Auges, so verhält sich

$$\frac{x}{\beta} = \frac{y}{\alpha + q}$$

$$\frac{\beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\gamma}. \quad \text{Beides multipliziert gibt:}$$

$$\frac{x}{\delta} = \frac{y \cdot \alpha}{\gamma(\alpha + q)}.$$

y ist in LISTINGS schematischem Auge gleich 15,0072 mm (oder 6,694 Par. Lin.), γ ist hier nach der bei der Berechnung von Vergrößerungen angenommenen Norm der Sehweite gleich 8 Zoll zu setzen. Daraus ergibt sich die Vergrößerung

$$\frac{\delta}{x} = 14{,}34\ \frac{\alpha + q}{\alpha}.$$

Da q gegen α gewöhnlich sehr klein ist, können wir die Vergrößerung gleich $14^1/_3$ mal annehmen.

Das Gesichtsfeld, welches man übersieht, ist bei dieser Methode durch den undeutlich gesehenen Rand der Pupille des beobachteten Auges nicht scharf begrenzt. Um eine bestimmte Grenze passend zu wählen, kann man die nach dem Rande der Pupille des beobachteten Auges gezogenen Visierlinien des Beobachters nehmen, deren Kreuzungspunkt[1] im Mittelpunkt der Pupille des Beobachters liegt. Wenn man diese Visierlinien wie Lichtstrahlen behandelt, die von dem Mittelpunkte der Pupille des Beobachters ausgehen, findet man, daß das Gesichtsfeld des Beobachters auf der Netzhaut des beobachteten Auges dem Zerstreuungsbilde entspricht, in welchem der Mittelpunkt der Pupille des Beobachters dort erscheint. Liegt dieser Mittelpunkt oder vielmehr sein durch die Konkavlinse gesehehenes Bild im ersten Brennpunkte des beobachteten Auges, so ist der Zerstreuungskreis, wie im vorigen Paragraphen bei den entoptischen Erscheinungen nachgewiesen ist, ebenso groß wie die Pupille des beobachteten Auges. Meist wird aber das Auge des Beobachters sich dem beobachteten Auge nicht so weit nähern können, und dann wird der dem Ge-

[1] S. § 11 S. 104.

sichtsfelde gleiche Zerstreuungskreis kleiner als die Pupille des beobachteten Auges werden, um so kleiner, je weiter der Beobachter sich entfernt.

B. Darstellung der Netzhaut im reellen umgekehrten Bilde.

Die zweite Methode, das Bild der Netzhaut dem Beobachter bequem sichtbar zu machen, besteht darin, daß man nahe vor das beobachtete Auge eine Konvexlinse von kurzer Brennweite, 1 bis 3 Zoll, hält. Es sei wieder in Fig. 103 *a* ein beleuchteter Punkt der Netzhaut, *b* sein Bild außerhalb des beobachteten Auges *A*, *B* eine Konvexlinse, auf welche die Strahlen fallen, ehe sie sich zum Bilde vereinigen. Diese entwirft ein kleineres und näheres Bild, als *b* ist, in *d*, ebenfalls in umgekehrter Stellung, wie das in *b*. Das Auge des Beobachters befindet sich in *C*, so weit entfernt, als es zur Akkommodation dieses Auges für das Bild notwendig ist.

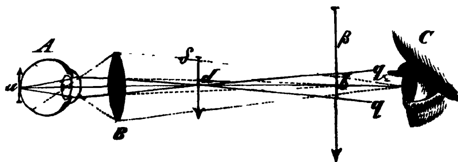


Fig. 103.

Ist *p* die positive Brennweite der Linse *B*, und wird die Entfernung *Bb* wieder mit α, *Bd* mit γ bezeichnet, so ist

$$\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{p}.$$

Da α meist sehr viel größer ist als p, so wird γ nahehin gleich p, bleibt aber stets etwas kleiner.

Die Größe eines Netzhautteiles im Punkte *a* sei x, die seines Bildes in *b* sei β, die des letzten Bildes in *d* sei δ, und die Entfernung der Netzhaut vom hinteren Knotenpunkte des Auges sei y, die Entfernung des ersten Hauptpunktes der Linse *B* vom vorderen Knotenpunkte des Auges *A* sei q, so ist

$$\frac{x}{\beta} = \frac{y}{\alpha + q}$$

$$\frac{\beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\gamma}. \quad \text{Beides multipliziert gibt}$$

$$\frac{x}{\delta} = \frac{y \cdot \alpha}{\gamma \cdot (\alpha + q)} = \frac{y \cdot (\alpha + p)}{p(\alpha + q)}.$$

In der Regel stellt man die Linse *B* so, daß die Pupille von *A* in ihrem einen Hauptbrennpunkte liegt, dann wird also p nahehin gleich q, und die Vergrößerung

$$\frac{\delta}{x} = \frac{p}{y}.$$

Nehmen wir für y den Wert aus Listings schematischem Auge, so ergibt sich, daß das Bild δ

2 mal vergrößert ist, wenn $p = 30$ mm (13,4‴)
3 „ „ „ „ $p = 45$ „ (20,1‴)
4 „ „ „ „ $p = 60$ „ (26,8‴).

Dies ist die wirkliche Vergrößerung des objektiven Bildes. Die Vergrößerung für den Beobachter, wenn die Entfernung *Cd* gleich *c* gesetzt wird, ist

$$\frac{p}{yc} \times 8 \text{ Zoll.}$$

Das Gesichtsfeld sieht der Beobachter bei dieser Methode begrenzt durch die Pupille des beobachteten Auges, so lange die Konvexlinse diesem Auge sehr nahe steht. Je weiter man die Konvexlinse aber entfernt, desto stärker vergrößert erscheint die Pupille, bis sie endlich in die Nähe des Brennpunktes der Glaslinse kommt, dann verschwindet der Pupillarrand ganz aus dem Gesichtsfelde, und die Ausdehnung des letzteren wird nur noch von der Apertur dieser Linse bestimmt. Um die Größe des Gesichtsfeldes zu bestimmen, können wir wieder, wie in dem vorigen Falle, die Visierlinien des Beobachters wie Lichtstrahlen behandeln. Zunächst entwirft die Linse B ein Bild vom Kreuzungspunkte der Visierlinien in der Nähe ihres Brennpunktes, also nahehin in der Ebene der Pupille des beobachteten Auges. Von da divergieren die Visierlinien nach dem Hintergrund des beobachteten Auges hin. Da ihr Vereinigungspunkt in der Nähe des vorderen Knotenpunktes des beobachteten Auges liegen wird, oder vielleicht auch, je nach der Stellung der Linse B, ganz mit diesem Knotenpunkte zusammenfallen wird, so gehen die Visierlinien des Beobachters fast ungebrochen in das beobachtete Auge hinein. Ihr Gang ist in Fig. 103 durch die punktierten Linien angedeutet. Ist die Apertur der Linse B gleich u, der Durchmesser des Gesichtsfeldes auf der Netzhaut gleich v, so ist

$$\frac{v}{y} = \frac{u}{p}.$$

Da man bei so kleinen Linsen recht gut die Apertur gleich der halben Brennweite machen kann, also $u = \frac{1}{2} p$, so wird alsdann

$$v = \frac{1}{2} y = 7\frac{1}{2} \text{ mm.}$$

Man übersieht also in diesem Falle ein größeres Gesichtsfeld, als es ohne künstliche Erweiterung der Pupille durch Atropin bei der Beobachtung mit Konkavgläsern möglich ist.

VII.

Beleuchtungsapparate der Augenspiegel.

Nach den drei oben angeführten Methoden kann die Beleuchtung direkt mit einem Lichte geschehen, oder mit einem durchbohrten undurchsichtigen Spiegel, oder mit unbelegten, also durchsichtigen Glasplatten als Spiegel.

Beleuchtung ohne allen Spiegel läßt sich nur für das umgekehrte Bild der Netzhaut anwenden, erfordert eine beträchtliche Geschicklichkeit, und wäre etwa nur da zu empfehlen, wo gerade kein anderes Instrument als eine einfache Konvexlinse von kurzer Brennweite zur Hand ist. Die Ausführung der Beobachtung ist folgende. Der Beobachter sieht dicht neben einem Lichte vorbei und, durch einen Schirm gegen dessen direkte Strahlen geschützt, wie es in Fig. 97 abgebildet ist, nach dem beobachteten Auge hin, und bringt eine Konvexlinse von 2 bis 4 Zoll Brennweite vor dieses Auge, wie in Fig. 103. Um die richtige Stellung zu finden, bringt man diese Linse zuerst ganz dicht vor das beobachtete Auge, und entfernt sie allmählich so weit, bis man die Pupille so stark vergrößert erblickt, daß ihre Ränder hinter denen der Linse verschwinden. Man erblickt dann ein umgekehrtes reelles Bild der Netzhaut bei d

Fig. 103. Um die Helligkeit dieses Bildes zu bestimmen, verfolgen wir nach den Vorschriften von Nr. V dieses Paragraphen das Strahlenbündel, welches vom Netzhautpunkte *a* Fig. 103 ausgeht; es wird von den brechenden Flächen des Auges nach *b* hin, darauf von der Linse *B* nach *d* hin konvergent gemacht, divergiert hinter *d*, und ist bei *q q* am Auge des Beobachters jedenfalls breit genug, daß die Pupille des Beobachters ganz hineintauchen und also die Netzhautstelle mit ihrer ganzen wirklichen Helligkeit sehen kann. Diese wirkliche Helligkeit verhält sich zur normalen oder größtmöglichen Helligkeit nach V wie der Teil des Strahlenkegels *q q*, der die Flamme trifft, zum ganzen Strahlenkegel. Wenn nun die Flamme hinreichend groß und passend gestellt ist, so brauchen nur sehr wenig Strahlen des Kegels *q q* bei der Flamme vorbei zu gehen, um die Pupille des Beobachters auszufüllen. Dann wird die wirkliche Helligkeit der Netzhautstelle *a* sehr wenig kleiner sein als die normale Helligkeit, und die scheinbare Helligkeit für den Beobachter gleich der wirklichen.

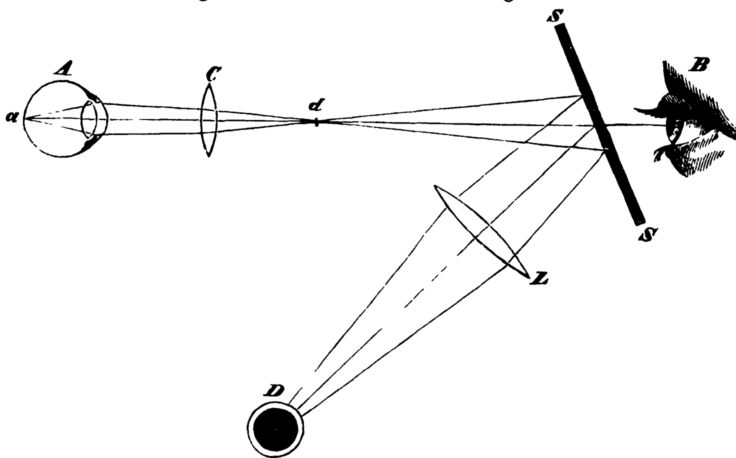


Fig. 104.

Sehr viel bequemer wird die Beobachtung, wenn der Beobachter einen durchbohrten undurchsichtigen Spiegel anwendet, um das Auge *A* zu erleuchten. Es sei in Fig. 104 wieder *A* das beobachtete, *B* das beobachtende Auge, *C* die Konvexlinse, und *S S* ein durchbohrter Spiegel. Von dem Netzhautpunkte *a* wird ein Bild bei *d* entworfen, welches der Beobachter durch die Öffnung des Spiegels hin betrachtet. Von dem ganzen von *a* kommenden Strahlenkegel geht nur der schmale Teil für die Beleuchtung verloren, welcher durch die Öffnung des Spiegels fällt, der ganze übrige Teil wird reflektiert und kann dem leuchtenden Körper zugelenkt werden. Zu dem letzteren Ende ist entweder der Spiegel *S S* ein Hohlspiegel (Ruete), oder aber ein Planspiegel (Coccius) oder Konvexspiegel (Zehender), neben dem man eine Linse *L* angebracht hat, welche die Strahlen auf den leuchtenden Körper vereinigt. Aus dieser Darstellung folgt schon nach Nr. V, daß die Helligkeit der Erleuchtung nahezu die normale sein kann.

Das Gesichtsfeld für den Beobachter fanden wir bedingt durch die Größe der Linse *C*, wenn die Pupille im Brennpunkte dieser Linse steht. Es fragt sich, ein wie großer Teil der Netzhaut erleuchtet werden kann. Da alles Licht durch die Linse *C* in das Auge des Beobachters fällt, kann natürlich das be-

leuchtete Feld der Netzhaut nicht größer als das Zerstreuungsbild der Linse C sein, welches selbe Zerstreuungsbild auch, wie wir in VI gezeigt haben, dem Gesichtsfelde des Beobachters entspricht. Dies Zerstreuungsbild wird in allen Teilen sein Maximum der Helligkeit haben, wenn von jedem Teil der Linse C Licht auf jeden Teil der Pupille fällt. Diese Bedingung wird erfüllt sein, wenn die Pupille des beobachteten Auges gleich oder kleiner als das Bild ist, welches die Linse C in der Nähe der Pupille von dem Spiegel $S\,S$ (oder der Linse L) entwirft, und von jedem Punkte dieses Spiegels, mit notwendiger Ausnahme der mittleren Durchbohrung, Licht auf jeden Teil der Linse C fällt. Das letztere wird aber wiederum geschehen, wenn die Linse C an dem Orte steht, wo der Spiegel das Bild der Lampenflamme D entwirft, und die Linse gleich oder kleiner als dieses Bild ist.

Um ein Beispiel solcher Konstruktion zu geben. wollen wir annehmen. man verlange von dem Augenspiegel eine viermalige Vergrößerung und gebe dementsprechend der Linse C eine Brennweite von 60 mm und eine Apertur von 30 mm. Der Spiegel. welcher ein durchbohrter Konkavspiegel sein möge. muß so weit von dem Orte des Bildes d entfernt sein. daß der Beobachter sein Auge für das Bild akkommodieren kann, also etwa 150 mm. Dann steht der Spiegel S von der Linse C 210 mm ab. Nach § 9 Gleichung 14b) wird sein von der Linse entworfenes Bild $= {}^{60}/_{150} = {}^{2}/_{5}$ seiner eigenen Größe sein. Da nun sein Bild der Pupille des beobachteten Auges gleich sein soll, und diese bei künstlicher Erweiterung bis auf 10 mm Durchmesser kommen kann, so müssen wir dem Spiegel 25 mm Durchmesser geben

Die Brennweite, welche wir dem Spiegel geben müssen. bestimmt sich nun durch die Bedingung. daß er ein Bild der Lampenflamme entwerfen muß, welches die Linse C deckt. Die Flamme größerer ARGANDscher Brenner hat etwa 15 mm Durchmesser. Setzen wir in § 9 Gleichung 14b) für β_1 den Durchmesser der Linse C 30 mm, für β_2 den Durchmesser der Lampenflamme 15 mm. für f_1 die Entfernung CS gleich 210 mm. so wird die Brennweite F des Spiegels gefunden gleich 70 mm. und die Lampenflamme muß 105 mm vom Spiegel entfernt sein.

Wenn man nicht einen Konkavspiegel. sondern einen ebenen Spiegel und eine konvexe Glaslinse wie in Fig. 104 anwenden will, muß man statt der Entfernung des Spiegels von der Linse C in der Rechnung die Summe der Entfernungen der beiden Linsen L und C von der Mitte des Spiegels nehmen.

Wenn der Beobachter den Spiegel und die Linse frei in der Hand hält. wird es natürlich nicht möglich sein. die Entfernungen dieser Teile. die der Rechnung zugrunde gelegt sind. genau einzuhalten. und man wird auch bei ziemlich großen Abweichungen davon noch gute Bilder erhalten; dennoch ist es aber wohl für den Beobachter vorteilhaft. die besten Bedingungen für die Haltung seines Instruments zu kennen

Wenn mit einem durchbohrten Spiegel und einem Konkavglase beobachtet werden soll, sind die Verhältnisse ungünstiger. In Fig. 105 ist wieder A das beobachtete, B das beobachtende Auge. S der Spiegel. Soll der Netzhautpunkt a beobachtet werden, so muß ein Teil des von ihm ausgehenden Strahlenkegels in das Auge des Beobachters fallen, wir wollen diesen Teil α nennen, ein anderer Teil $(1 - \alpha)$ von dem Spiegel nach dem Lichte reflektiert werden. Ist also H die normale Helligkeit der Netzhautstelle a, so wird unter diesen Umständen nach Nr. V dieses Paragraphen $H \cdot (1 - \alpha)$ ihre wirkliche Helligkeit sein. Es sei wie früher J der Flächeninhalt der scheinbaren Pupille des beobachteten Auges A, B eben-

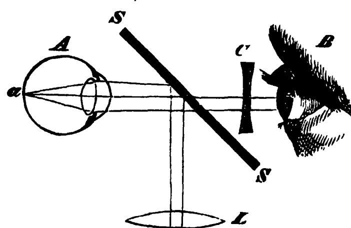


Fig. 105.

derselbe von B, g die Entfernung der beiden scheinbaren Pupillen voneinander, und h die Akkommodationsdistanz des Auges A, so ist der Querschnitt des Teils des Strahlenbündels, der in das Auge des Beobachters fällt,

$$\alpha J \cdot \frac{(h-g)^2}{h^2}.$$

Dieser Querschnitt wird in der Regel kleiner sein als R. Die scheinbare Helligkeit für den Beobachter wird dann

$$H \cdot \alpha (1-\alpha) \frac{J \cdot (h-g)^2}{R h^2}.$$

Die Größe $\alpha(1-\alpha)$ erreicht ihr Maximum, wenn $\alpha = 1/2$, sie wird alsdann gleich $1/4$. Die vorteilhafteste Anordnung in bezug auf Helligkeit wird also die sein, wo die Hälfte des Strahlenkegels in das Auge des Beobachters fällt, die Hälfte zurückgeworfen wird. Man erreicht dann die Helligkeit

$$1/4\, H \cdot \frac{J \cdot (h-g)^2}{R h^2}.$$

Um ein möglichst großes Feld in dem beobachteten Auge zu beleuchten, wende man eine große und nahestehende Lampenflamme an, oder wenn dies nicht zureicht, kann man bei L eine Sammellinse anbringen. Entwirft diese ein Bild der Flamme, welches die Pupille ganz deckt, so wird im Auge A das ganze Zerstreuungsbild der Linse L beleuchtet.

Für die Beobachtung mit Konvexlinsen würde die Beleuchtung mit unbelegten Glasplatten nur $1/4$ der Helligkeit geben, welche man mit durchbohrten undurchsichtigen Spiegeln erreichen kann. Dagegen kann diese Beleuchtung bei der Beobachtung mit Konkavlinsen unter Umständen mit Vorteil angewendet werden.

Man stelle sich nämlich in Fig. 105 den Spiegel SS vor als nicht durchbohrt und unbelegt, bestehend aus einer oder mehreren übereinander gelegten Glasplatten. Es werde von jedem Lichtstrahl, der auf den Spiegel fällt, der Teil α durchgelassen, der Teil $(1-\alpha)$ zurückgeworfen. Ist H die normale Helligkeit der Netzhautstelle a, bei direkt einfallendem Lichte, so gibt das von dem Spiegel reflektierte Licht nur die Helligkeit $H(1-\alpha)$. Der Querschnitt des Strahlenbündels, welches von a ausgeht, ist, da wo es auf B fällt, jetzt

$$J \frac{(h-g)^2}{h^2}.$$

Da nur der Teil α des Lichts durch die Platten hindurchgeht, so wird die scheinbare Helligkeit für den Beobachter:

$$H \cdot \alpha (1-\alpha) \frac{J \cdot (h-g)^2}{R \cdot h^2}.$$

Dieser Ausdruck erreicht auch in diesem Falle ein Maximum, wenn α gleich $1/2$ ist, und wird

$$1/4\, H \cdot \frac{J \cdot (h-g)^2}{R \cdot h^2},$$

solange

$$R < \frac{J(h-g)^2}{h^2}.$$

Diese Bedingung wird bei normalen Augen in der Regel erfüllt sein, da die Pupille J des von einer großen Lichtmenge getroffenen Auges A in der Regel enger sein wird als die Pupille R des Beobachters. Nur bei der künstlichen Erweiterung der Pupille J durch Atropin wird es nicht der Fall sein, und dann wird die scheinbare Helligkeit einfach gleich $^1/_4 H$. Im letzteren Falle ist die Beobachtung mit einem durchbohrten Spiegel vorteilhafter, denn dort gilt der gegebene Ausdruck für die Helligkeit, solange

$$R < \alpha \cdot \frac{J(h-g)^2}{h_2} \quad \text{und}$$
$$\alpha = {}^1/_2 .$$

Wenn man normale Augen ohne Anwendung von Atropin untersucht, so würde man mittels beider Arten der Beleuchtung dieselbe Helligkeit erhalten können, wenn die Pupillen unbeweglich wären. Der belegte Spiegel wirft aber im ganzen mehr Licht in das beobachtete Auge, blendet es stärker, und die Pupille verengt sich mehr, so daß unter diesen Umständen der unbelegte Spiegel ein größeres Gesichtsfeld und eine größere Helligkeit geben kann. Außerdem beleuchtet er die gesehene Netzhautfläche gleichmäßig, während beim durchbohrten Spiegel das Zerstreuungsbild der Durchbohrung die Beleuchtung ungleichmäßig macht. Endlich ist der Hornhautreflex bei dem unbelegten Spiegel weniger störend, weil das vom Spiegel reflektierte Licht mehr oder weniger polarisiert ist, und von der Hornhaut ohne Änderung seiner Polarisation zurückgeworfen nur zu einem sehr kleinen Teile durch die Platten zurückgeht.

Damit der unbelegte Spiegel die Hälfte des auffallenden Lichts zurückwerfe, kann man ihn entweder aus einer Glasplatte bestehen lassen, oder aus mehreren übereinandergelegten, muß aber den Einfallswinkel der reflektierten Lichtstrahlen dann passend wählen. Der passende Einfallswinkel für

eine Platte ist 70°
drei Platten „ 60°
vier Platten „ 56°.

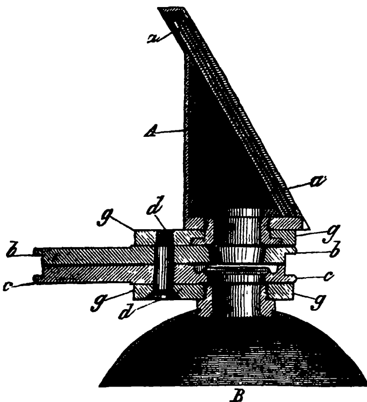


Fig. 106.

Formen der Augenspiegel.

1. Augenspiegel von Helmholtz, mit reflektierenden Glasplatten und Konkavlinsen. Es ist dieser Augenspiegel in Fig. 106 im Querschnitt und natürlicher Größe, in Fig. 107 von vorn gesehen in halber Größe dargestellt, mit einer Modifikation der ursprünglichen Form, welche von dem Mechanikus Rekoss angebracht ist, nämlich mit zwei beweglichen Scheiben, welche die nötigen Konkavlinsen enthalten. Die drei reflektierenden Glasplatten sind mit *a a* bezeichnet, sie bilden die nach vorn gekehrte Hypotenusenfläche eines prismatischen Kastens, dessen Grundfläche ein rechtwinkeliges Dreieck ist, wie man im Querschnitte Fig. 106 sieht. Die übrigen Flächen dieses hohlen Prismas sind aus Metallplatten gebildet und, um das Licht möglichst vollständig zu absorbieren, innen mit schwarzem Samt ausgelegt. Die kleinere Kathetenfläche des Prismas ist an dem Gestell des Augenspiegels so befestigt, daß sie sich um die optische Achse des Instruments drehen kann, und hat dieser Achse entsprechend eine Öffnung. Die Glasplatten werden durch einen rechtwinkeligen

Rahmen an dem prismatischen Kasten zurückgehalten; der Rahmen selbst ist durch zwei Schrauben *e e* an die dreiseitigen Grundflächen des Prismas befestigt. Die Glasplatten bilden einen Winkel von 56° mit der optischen Achse des Instruments.

In das metallene Gestell des Instruments *g g* ist ferner eine Achse *d d* eingelassen, um welche sich zwei Scheiben *b b* und *c c* drehen. Jede dieser Scheiben hat fünf Öffnungen. In je vieren sind Konkavgläser von 6 bis 13 Zoll Brennweite eingesetzt. die fünfte ist leer. Diese Öffnungen können nacheinander in die optische Achse des Instruments gebracht werden. so daß der Beobachter. welcher sein Auge an das beckenförmige Okularstück *B* anlegt, durch sie und die Glasplatten *a a* hindurchsieht. In Fig. 106 ist die leere Öffnung der Scheibe *b b* und eine mit einer Linse versehene der Scheibe *c c* vorgeschoben. So kann der Beobachter eine beliebige von den acht Linsen oder zwei von ihnen gleichzeitig vor sein Auge bringen. Damit die Scheiben ihre Stellung nicht ohne Willen des Beobachters verändern. sind an ihrem Rande Grübchen angebracht. in welche sich die Enden zweier Federn *h* einlegen.

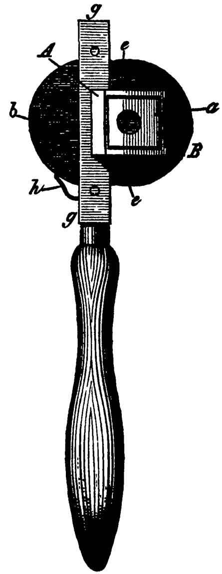


Fig. 107.

Für Beobachtungen mit Konkavgläsern. also bei starker Vergrößerung. an Personen. deren Pupille nicht künstlich erweitert ist. und bei großer Empfindlichkeit des beobachteten Auges gegen Licht. finde ich unter den beweglichen Spiegeln diese erste Form des Augenspiegels aus den Gründen. welche ich oben bei der Theorie der Beleuchtung durch unbelegte Glasplatten angeführt habe. noch immer am vorteilhaftesten. Wenn ein gesundes Auge durch diesen Spiegel beobachtet wird. kann es die Erleuchtung stundenlang. ohne geblendet zu werden. ertragen. Ich selbst habe oft 20 Studierenden hintereinander meine Netzhaut mit diesem Instrumente ohne Unbequemlichkeit gezeigt. während die Beleuchtung mit belegten Spiegeln nicht 5 Minuten ohne starke Blendung des Auges ertragen wird. Ich ziehe deshalb diesen Spiegel zu den meisten physiologischen Versuchen den anderen Formen vor. Für die augenärztlichen Untersuchungen dagegen wird ein größeres Gesichtsfeld und größere Helligkeit bei geringerer Vergrößerung meist vorteilhafter sein. und deshalb werden für dergleichen Beobachtungen meist belegte durchbohrte Spiegel mit Konvexlinsen angewendet

Will man den Spiegel gebrauchen. so setzt sich der Beobachter dicht vor den Beobachteten. und stellt an seiner Seite eine hell brennende Lampe auf. Ein undurchsichtiger Schirm wird so aufgestellt. daß er das Gesicht des Beobachteten beschattet. Der Beobachter bringt zuerst den Spiegl. ohne hindurchzusehen, ungefähr in die richtige Stellung vor das Gesicht des Beobachteten. und dreht ihn so. daß die Glasplatten ihren hellen Reflex auf das zu beobachtende Auge werfen. Dann blickt er hindurch und erblickt nun die Netzhaut rot erleuchtet. Wenn er nicht sogleich sein Auge für die feineren Teile der Netzhaut akkommodieren kann. dreht er mit dem Zeigefinger der Hand. welche das Instrument hält. eine der Scheiben. welche die Linsen enthält. bis er die passende Konkavlinse gefunden hat.

Wenn die Beleuchtung der Netzhaut verschwindet. achte man nur auf den hellen Reflex der Glasplatten im Gesichte des Beobachteten und führe diesen wieder auf das Auge zurück.

2. Augenspiegel von Ruete. mit durchbohrtem Konkavspiegel, auf Stativ dargestellt in Fig. 108. Auf einem runden Fuße von Holz ruht eine hohle Säule *a*, in deren Achsenkanale sich ein runder Stab *b* von Holz befindet. der hoch und niedrig geschoben und durch eine Feder. die sich am unteren Ende desselben befindet. in jeder beliebigen Höhe festgestellt werden kann. Auf diesem Stabe sitzt ein Halb-

kreis von Messing *c*, der sich mit dem Stabe hoch und niedrig, rechts und links stellen läßt. In diesem Halbkreise ist ein in der Mitte durchbohrter Hohlspiegel *d* von etwa 3 Par. Zoll Durchmesser und von einer Brennweite von etwa 10 Par. Zoll durch Schrauben, die je nach dem Bedürfnisse gelüftet oder stärker angezogen werden können, so befestigt, daß er um seine Horizontalachse gedreht werden kann. In der Mitte der Säule *a* befinden sich zwei hölzerne Ringe *e* und *f*, welche sich um die Säule drehen lassen. Jeder Ring trägt einen horizontal auslaufenden Arm *g* und *h*: der Arm *g* trägt einen geschwärzten Schirm, der einesteils dazu dient, um das Licht der Lampe vom Beobachter abzuhalten, anderenteils auch dazu, um, wenn es nötig ist, das vom Spiegel in das beobachtete Auge fallende Licht abzuschwächen, was man dadurch bewirkt, daß man einen Teil des Spiegels durch den Schirm beschattet. Der Arm *h*, welcher in 12 Zolle eingeteilt ist, trägt zwei vertikale Säulen, *i* und *k*, die rück- und vorwärts geschoben werden können; in jeder vertikalen Säule steckt ein am unteren Ende mit einer Feder versehener Stift von Messing *l* und *m*, den man auf- und abwärts schieben kann, und der durch die Feder in jeder Höhe, die man ihm gibt, festgehalten wird. Auf diese Stifte steckt man je nach den Umständen konkave oder konvexe Gläser, welche die aus dem beobachteten Auge zurückkehrenden Lichtstrahlen zu einem deutlichen Bilde für den Beobachter vereinigen. *A* ist der Beobachtete, *B* der Beobachter. Die Zeichnung ergibt leicht das übrige.

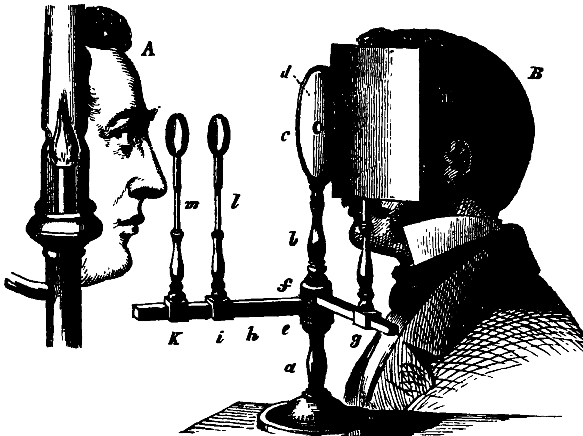


Fig. 108.

Für die Beobachtungen mit Konkavlinsen, die in der augenärztlichen Praxis allerdings wohl eine seltenere Anwendung finden, ist das Instrument nicht gut geeignet, weil sich die beiden Augen nicht hinreichend nähern können, und deshalb das Gesichtsfeld sehr klein wird. Für Beobachtungen mit Konvexlinsen dagegen, die in klinischen Lokalen angestellt werden, erscheint das Instrument sehr bequem, namentlich wenn man durch einen Assistenten den Kopf des Beobachteten so dirigieren läßt, daß seine Pupille in den Fokus der Lichtstrahlen kommt; auch kann durch Anbringung einer zweiten konvexen Okularlinse (die dann aber wohl besser hinter dem Spiegel anzubringen wäre) eine Art kleinen Fernrohrs zusammengesetzt und eine stärkere Vergrößerung erreicht werden. Die Helligkeit des Instruments ist sehr groß. Gelegenheit, die Netzhautbilder zu beobachten, ist nicht gegeben.

3. Epkens Augenspiegel, mit durchbohrtem Planspiegel, auf Stativ, verändert durch Donders und van Trigt. Das ganze Instrument ist im Querschnitte dargestellt auf Fig. 109 und in einer Seitenansicht Fig. 110. Der Spiegel *D*, einzeln abgebildet in Fig. 111, ist eine belegte Glasplatte, in deren Mitte der Beleg weggenommen ist, etwa in der Ausdehnung der Pupille; später hat Donders den Spiegel durchbohren lassen nach dem Vorgange von Coccius, um zu vermeiden, daß das in das Auge des Beobachters fallende Licht durch Reflexion geschwächt würde. Der Spiegel ist in einem würfelförmigen Kasten *EE* drehbar befestigt. Gedreht wird er mittels des Knopfes *F*. Das zu beobachtende Auge wird an die Öffnung des Kastens bei *N* angelegt, das des Beobachters bei *O*. Hier befindet sich eine solche Scheibe mit ver-

schiedenen Linsen, wie die von REKOSS bei dem Augenspiegel von HELMHOLTZ angebrachte. DONDERS wählt dazu drei positive mit 20, 8 und 4 cm Brennweite, und drei negative mit 16, 10 und 6 cm.

Mit dem kubischen Kasten hatte EPKENS eine konische Röhre verbunden, an

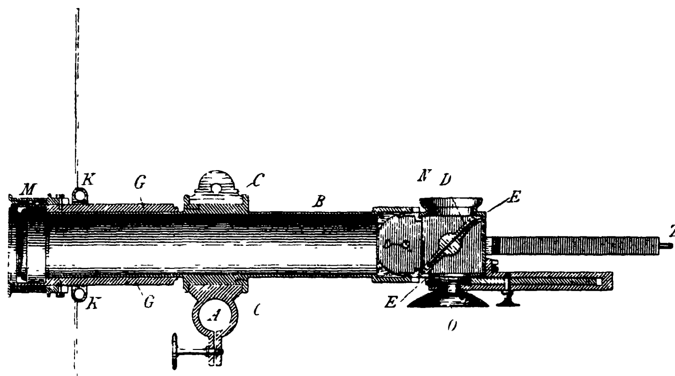


Fig. 109.

deren Ende, wo jetzt das Mikrometer *M* sich befindet, eine Lampe angebracht war. An das Ende der Röhre kann, wenn es nötig scheint, eine positive Linse gebracht werden, deren Brennpunkt wenig von der Flamme entfernt ist, so daß jemandem, der in den Spiegel hineinsieht, die ganze Glaslinse leuchtend erscheint, und dadurch ein größerer Teil der Netzhaut beleuchtet wird. Der ganze Apparat, an dem Stabe *A*

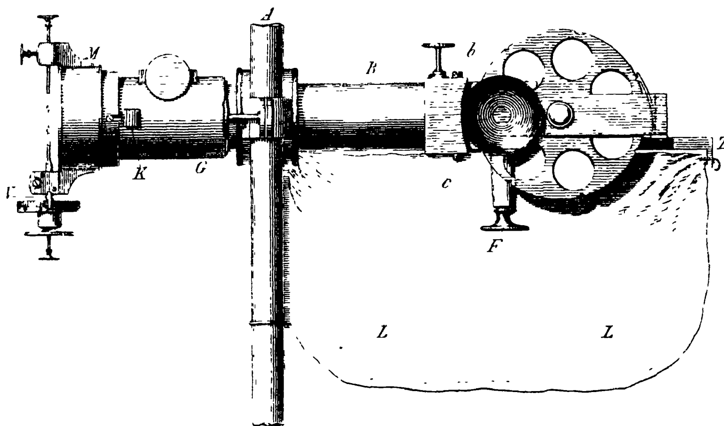


Fig. 110.

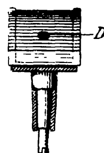


Fig. 111.

befestigt, kann an diesem auf und ab bewegt werden. Bei *K* ist eine kreisförmige Scheibe befestigt, mit schwarzem Zeug bezogen, um das überflüssige Lampenlicht abzuhalten, und am unteren Teile des Instruments ist ein Stück Wachstafft *L L* aufgehängt an der Stange *Z*, um das Gesicht des Beobachters von dem des Beobachteten zu trennen.

Da es aber schwierig war, kranke Personen immer zu richtigen Bewegungen ihres Auges zu bestimmen, wurde der Apparat von DONDERS und VAN TRIGT noch beweglicher gemacht. Es wurde die Röhre in einem Ringe *C* drehbar gemacht; der Würfel *E E* kann um die Achse, welche durch die Schrauben *b* und *c* bestimmt

wird, gedreht werden. Die Lampe wurde vom Instrumente getrennt. Am Ende der Röhre G wurde ein Mikrometer angebracht. Die Spitzen des Mikrometers a und b werden im beobachteten Auge abgebildet, wenn dieses richtig akkommodiert ist. Deshalb wurde das Mikrometer verschiebbar gemacht, vermittelst der Röhre G, welche sich auf der Röhre B verschiebt. V ist die Mikrometerschraube, durch deren Umdrehung der Abstand der Spitzen geändert und gemessen wird. Ist n der Abstand der Spitzen a und b, x ihre Entfernung vom vorderen Knotenpunkte des beobachteten Auges, und 15 mm der Abstand des hinteren Knotenpunktes von der Netzhaut, so ist der Abstand der Spitzen im Retinabildchen y

$$y = \frac{n}{x} \times 15 \text{ mm}.$$

Wenn man nun einen Zeichenapparat, wie man ihn bei Mikroskopen gebraucht, an der Öffnung O anbringt, und sowohl den Abstand der Spitzen als die Gefäße usw. der Netzhaut nachzeichnet, kann man die wahre Größe der Gefäße und anderer Netzhautteilchen bestimmen.

Später hat DONDERS noch für sehr kurzsichtige Augen ein zweites Mikrometer hinzugefügt, welches in die Röhre B eingeschoben wird. Außerdem hat er für die Beobachtung von Augen, deren Pupille durch Belladonna erweitert ist, für das Ende der Röhre B eine kegelförmige Erweiterung mit einer Sammellinse von größerer Apertur, als J hat, hinzugefügt, um ein größeres Feld im Auge zu beleuchten.

Dieser Spiegel ist namentlich für Untersuchung der Netzhaut mit Konkavgläsern bestimmt. Er läßt sehr genaue und sichere Untersuchungen und Messungen der Netzhautbilder und der kleineren Teile des Augenhintergrundes zu, und ist leicht und bequem zu gebrauchen. Ähnlich konstruiert ist der tragbare Augenspiegel von SAEMANN. Man denke sich die Röhre des Spiegels von EPKENS bis zu einem bloßen Ansatzstücke des Würfels verkürzt und das feste Gestell entfernt, statt der Scheibe, welche die Linsen enthält, eine Fassung, in welche die Linsen einzeln eingelegt werden, so hat man SAEMANNS Augenspiegel.

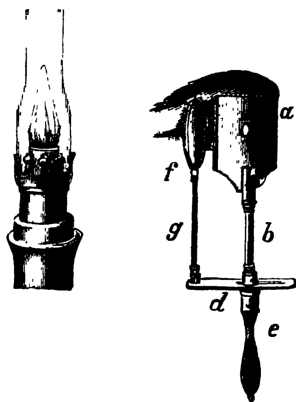


Fig. 112.

4. Portativer Augenspiegel von COCCIUS, mit durchbohrtem, belegtem, ebenem Spiegel und einer Beleuchtungslinse. Abgebildet in Fig. 112. Das Instrument besteht aus einem kleinen viereckigen Planspiegel a von 14 Par. Lin. Seite. Die Öffnung hat 2 Par Lin Durchmesser, und ihr vorderer, dem beobachteten Auge zugekehrter Rand ist etwas abgeschliffen. Der Spiegel ist in eine dünne Messingplatte gefaßt, welche an ihrem unteren Ende in einen kleinen Fortsatz übergeht, der an der Stange b befestigt ist. Die Beleuchtungslinse hat 5 Zoll Brennweite; um sie aber auch mit anderen vertauschen zu können, ist sie in einen geschlitzten federnden Ring f eingesetzt, von der Stange g und dem geschlitzten Querbalken d getragen. Der letztere wird durch festes Anschrauben des Griffes e festgeklemmt, um die Stellung der Linse gegen den Spiegel zu sichern, welche man gewählt hat. Auseinander genommen kann das Instrument in ein kleines Etui gelegt werden.

COCCIUS bringt, wie RUETE, die Konkavgläser wie die Konvexgläser zwischen Spiegel und Licht an. Da das erstere wegen der Reflexe unvorteilhaft ist, hat man später mehrere Hohlgläser in einem Schieberchen oder einzeln in Ringen an der Rückseite des Spiegels angebracht.

Wegen seiner Beweglichkeit ist dieser Spiegel für ärztliche Zwecke sehr brauchbar; man kann sowohl wie bei RUETES Spiegel mit Konvexlinsen, als auch wie bei EPKENS Spiegel mit Konkavlinsen bequem untersuchen.

5. Portativer Spiegel von ZEHENDER, mit durchbohrtem konvexen Metallspiegel und Beleuchtungslinse, mit ähnlicher Fassung, wie der von COCCIUS. Im wesentlichen unterscheidet sich das Instrument von dem letzteren nur dadurch, daß statt des ebenen Glasspiegels ein konvexer Metallspiegel von 6 Zoll Radius angebracht ist. Indem man die konvexe Linse dem konvexen Spiegel näher oder ferner stellt, erhält man ein reflektierendes System von veränderlicher Brennweite, was man den Umständen anpassen kann. Ein wesentlicher Vorteil scheint mir noch in dem Umstande zu liegen, daß der Spiegel von Metall gefertigt ist, und daher der Rand des Sehlochs dünn, gut geschwärzt und ohne Licht reflektierende Unebenheiten ist. Vorher habe ich nachgewiesen, daß bei den Beobachtungen mit dem durchbohrten Spiegel und der Konkavlinse zur Erlangung der größten Helligkeit nur die Hälfte des von einem Punkte der Netzhaut ausgehenden Strahlenbündels in das Auge des Beobachters fallen darf, falls nicht die Pupille des beobachteten Auges den mehr als doppelten Flächeninhalt von der des Beobachters hat. Der Beobachter wird daher in der Regel sich einen Teil seiner Pupille mit dem Rande der Öffnung des Spiegels verdecken müssen, und einen Teil dieses Randes gerade vor dem Auge haben. Es ist daher vorteilhaft, an diesem Rande alles zu vermeiden, was Licht reflektieren könnte, und das ist bei ZEHENDERS Metallspiegeln viel besser erreicht als bei COCCIUS' Glasspiegeln.

6. Prismenspiegel von MEYERSTEIN. Statt der metallischen Spiegel dient hierbei ein rechtwinkeliges Prisma, dessen Hypotenusenfläche das Licht zurückwirft. Der Beobachter sieht durch eine Durchbohrung des Prismas.

Später hat MEYERSTEIN mit dem durchbohrten Prisma eine Beleuchtungslinse verbunden, und zwischen dem Auge des Beobachters und dem Prisma ein kleines Fernrohr angebracht, endlich der größeren Wohlfeilheit wegen das Prisma durch einen durchbohrten Spiegel ersetzt; auch glaube ich, daß die Anwendung des Prismas eher Nachteile als irgend einen Vorteil mit sich brachte. Das Ganze hat eine Fassung, mittels deren man es auf den Augenhöhlenrand des Beobachteten aufsetzen kann, und durch einen Arm mit zwei Gelenken ist auch ein Wachskerzchen mit dem Apparate verbunden, welches zur Beleuchtung dient.

Da das äußere Licht von dem beobachteten Auge ganz abgeschlossen wird, soll es auch in einem hellen Zimmer gebraucht werden können. Dadurch, daß man das Okularglas des kleinen Fernrohrs heraus- oder hereinschiebt, kann man das optische System für Augen von jeder Sehweite passend machen.

7. Augenspiegel von ULRICH. Die wesentlichen Teile von RUETES Augenspiegel sind in einer portativen Röhre angebracht, welche seitlich auch ein Licht zur Beleuchtung trägt.

Von den Beobachtungen, welche mit dem Augenspiegel an normalen Augen anzustellen sind, erwähne ich folgendes. Der Grund des Auges erscheint bei starker Beleuchtung (mit belegten Spiegeln und Konvexlinsen) rot, nur die Eintrittsstelle des Sehnerven zeichnet sich hellweiß ab. Man sieht auf dem roten Grunde zunächst die Netzhautgefäße verlaufen, deren Stämme aus der Mitte des weißen Sehnerven hervortreten. Die Arterien sind durch ihre lichtere rote Farbe und durch einen stärkeren Lichtreflex an ihrer Oberfläche zu erkennen. Zwischen den Netzhautgefäßen erscheint der Grund des Auges je nach der Menge des Pigments bald hellrot, bald braun, und man erkennt, namentlich an den mehr zur Seite gelegenen Teilen, sehr häufig die Gefäße der Aderhaut, wie es in Fig. 113 dargestellt ist. Man sieht daselbst in der Mitte die Eintritsstelle des Sehnerven; *a a a* sind Äste der Netzhautarterie, *b b b* der Netzhautvene, dazwischen sieht man die viel weiteren Gefäße der Aderhaut. Letztere sind nicht immer gleich deutlich; in den meisten Augen ist die Pigmentschicht über diesen Gefäßen so dünn, daß sie sich dadurch von den stärker pigmentierten Zwischenräumen abheben.

Bei starker Beleuchtung zeigt der Augengrund keine auffallenden Unterschiede in der Helligkeit, mit Ausnahme der Eintrittsstelle des Sehnerven. Es scheint, daß

dabei verhältnismäßig viel Licht durch die Pigmentschicht der Aderhaut dringt, von der Sclerotica reflektiert wird und wieder zurückkehrt. Daß bei den meisten Augen ziemlich viel Licht durch die Augenhäute dringen kann, zeigt uns der Versuch (§ 10. S. 73), bei welchem das Netzhautbildchen im inneren Augenwinkel sichtbar wird, und ferner die entoptische Erscheinung der Aderfigur der Netzhaut mittels Lichts, welches die Sclerotica durchdringt. Dieser Teil des zurückkehrenden Lichts, welcher von der Reflexion in der Aderhaut und Sehnenhaut herrührt, bleibt nun wohl ziemlich gleich auf allen Stellen des Augengrundes, auch wenn die Helligkeit der Netzhaut selbst sehr variiert.

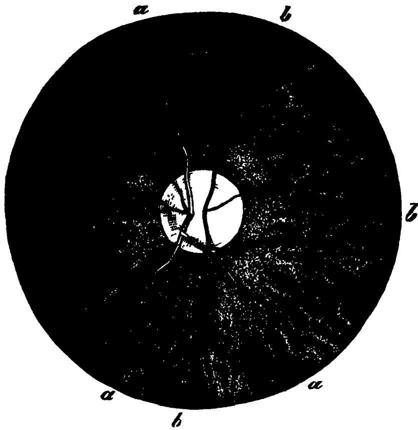


Fig. 113.

Bei schwacher Beleuchtung (mit reflektierenden Glasplatten) erscheinen dagegen die Teile des Augengrundes in der Nähe des Sehnerven besonders hell, und die Helligkeit nimmt von hier aus im allgemeinen nach den Rändern der Netzhaut hin gleichmäßig ab, nur die Stelle des direkten Sehens zeichnet sich besonders durch geringe Helligkeit und eine mehr gelbliche Farbe vor ihrer Nachbarschaft aus, was bei der stärkeren Beleuchtung nicht der Fall ist. Der Grund davon ist wohl darin zu suchen, daß bei schwacher Beleuchtung nicht merklich viel Licht durch die Pigmentschicht hin und zurück geht, daher der wahrnehmbare Lichtreflex hauptsächlich von den Teilen der Netzhaut, namentlich ihren Gefäßen herrührt. Diese fehlen an der Stelle des direkten Sehens.

Die letztere Stelle zeigt bei beiden Beobachtungsweisen ein kleines lichtes Fleckchen von querovaler Form, welches Coccius, der es zunächst bemerkte, als den Reflex der Netzhautgrube bezeichnet, während Donders später direkt nachwies, daß dieser kleine Lichtreflex die Stelle des direkten Sehens einnimmt.

Man muß zu diesem Versuche einen ebenen Spiegel anwenden, hinter welchem eine Konkavlinse steht (Donders-Epkens oder Helmholtz). Als Gesichtsobjekt benutze man eine Lichtflamme oder das Mikrometer an Donders Instrumente. Das beobachtete Auge sieht das gewählte Objekt im Spiegelbilde; man sorge, daß es sich gehörig dafür akkommodieren könne, und lasse es einen bestimmten Punkt des Objekts fixieren. Der Beobachter erblickt dann ein ganz scharf gezeichnetes umgekehrtes Bild des Objekts auf der Netzhaut des beobachteten Auges und an der direkt fixierten Stelle den Reflex der Netzhautgrube. Sollte dieser zu schwach sein, um von Anfang her wahrgenommen zu werden, so geschieht dies leichter, wenn der Beobachter den Beobachteten bald auf diesen, bald auf jenen Teil des Gesichtsobjekts seinen Blick zu richten heißt. Der kleine Reflex wandert dann dementsprechend auf dem Netzhautbilde umher.

Um die Genauigkeit des Netzhautbildes zu prüfen, ist das von Donders an dem Augenspiegel von Epkens angebrachte Mikrometer zweckmäßig zu gebrauchen. Für meinen Spiegel wähle ich zu dem gleichen Zwecke als Gesichtsobjekt einen vor einem Lichte in horizontaler Richtung ausgespannten Faden. Von vertikalen feinen Linien gibt mein Instrument nämlich wegen der mehrfachen reflektierenden Flächen mehrfache Bilder. Sobald das beobachtete Auge sich scharf für das betreffende Objekt akkommodiert, erscheint es auch im Netzhautbilde ganz scharf. Sowie sich die Akkommodation ändert, wird es verwaschen. Übrigens braucht man gar nicht so feine Objekte, um die Veränderung des Bildes bei der Akkommodation zu sehen. Es genügt, wenn das beobachtete Auge nicht kurzsichtig ist, in der Ferne ein Licht auf-

zustellen, dessen Netzhautbild im beobachteten Auge man betrachtet, während dieses Auge abwechselnd nach einem fernen oder nahen Gesichtspunkte, die in gleicher Richtung liegen, hinblickt. Bei der Akkommodation für die Ferne erscheint auch das Bild des fernen Lichts deutlich, bei der Akkommodation für die Nähe wird es verwaschen. Meistens verschwinden dem Beobachter dabei auch die Netzhautteile des beobachteten Auges, wenn er mit der Akkommodation seines Auges der neuen Lage des Bildes nicht folgen kann, und er muß dann ein anderes Konkavglas gebrauchen, um sich zu überzeugen, daß auf der deutlich gesehenen Netzhaut des beobachteten Auges ein undeutliches Bild des fernen Lichts entworfen sei. Der Versuch kann auch so abgeändert werden, daß das beobachtete Auge fortdauernd in die Ferne sieht, das Licht aber in die Nähe gebracht wird, damit sich der Beobachter überzeuge, daß von dem nahen Lichte ein undeutliches Bild entworfen werde.

Das Augenleuchten ist seit ältester Zeit bekannt an den Augen von Hunden, Katzen und anderen Tieren, welche im Hintergrunde ihres Auges ein Tapetum, d. h. eine pigmentlose, mit stark reflektierenden dünnen Fasern oder Lamellen belegte Stelle haben. Bei diesen ist der Lichtreflex so stark, daß er unter einigermaßen günstigen Umständen leicht gesehen wird. Eine sehr allgemein verbreitete alte Meinung war es, daß die sogenannten leuchtenden Tieraugen Licht entwickeln sollten, namentlich wenn die Tiere gereizt würden, daher man denn geneigt war, diese angeblich vorhandene Lichtentwicklung dem Einflusse des Nervensystems zuzuschreiben. Man sieht das Leuchten der Tieraugen in dunklen Räumen am auffallendsten, wenn Licht von der Rückseite des Beobachters dicht neben seinem Kopfe vorbei in das Auge des Tieres fällt, und eben deshalb konnte den Beobachtern oft das wirklich einfallende Licht verborgen bleiben. Ebenso sollten die pigmentlosen Augen weißer Kaninchen und albinotischer Menschen durch eigene Lichtentwicklung leuchten. PREVOST[1] zeigte zuerst, daß das sogenannte Leuchten der Tieraugen niemals in vollkommener Dunkelheit und weder willkürlich noch durch Affekte hervorgebracht wird, sondern stets nur durch Reflexion von einfallendem Lichte entstehen kann. GRUITHUISEN[2] hat unabhängig hiervon dasselbe gefunden; er weist nach, daß das Tapetum daran schuld sei, verbunden mit einer „außerordentlichen Brechung“ der Linse. Auch in den Augen toter Tiere sah er das Leuchten. Diese Tatsachen bestätigen RUDOLPHI[3], J. MÜLLER[4], ESSER[5], TIEDEMANN[6], HASSENSTEIN[7]. RUDOLPHI macht darauf aufmerksam, daß man in einer bestimmten Richtung in das Auge sehen müsse, um das Leuchten wahrzunehmen. ESSER erklärt richtig den Wechsel der Farbe daraus, daß verschieden gefärbte Teile der Netzhaut durch die Pupille erblickt würden. HASSENSTEIN endlich findet, daß das Leuchten hervortritt, wenn die Augen in Richtung ihrer Achse komprimiert werden, und vermutete, daß auch beim lebenden Tiere das Leuchten willkürlich erregt werde, indem durch den Druck der Muskeln die Augenachse verkürzt werde. Man erkannte also das Leuchten als ein Reflexphänomen an, ohne sich aber klar zu machen, von welchen Bedingungen das Leuchten oder Nichtleuchten abhinge.

An menschlichen Augen war das Leuchten früher nur bei seltenen Krankheitszuständen beobachtet worden, namentlich bei Geschwülsten im Hintergrunde des Auges. Auch bei Mangel der Iris hat BEHR[8] es gesehen und gefunden, daß die

[1] *Biblioth. britannique.* 1810. T. 45.
[2] Beiträge zur Physiognosie und Eautognosie. S. 199.
[3] Lehrbuch der Physiologie. I. 197.
[4] Zur vergleichenden Physiologie d. Gesichtssinns. Leipzig 1826. S. 49. — Handbuch d. Physiologie. 4. Aufl I. 89.
[5] KASTNERS Archiv für die gesamte Naturlehre. Bd. VIII. S. 399.
[6] Lehrbuch der Physiologie. S. 509.
[7] De luce ex quorundam animalium oculis prodeunte atque de tapeto lucido. Jena 1836.
[8] HECKERS Annalen. 1839. I. S. 373.

Augen des Beobachters fast ganz parallel mit den einfallenden Strahlen nach den Augen der Kranken blicken mußten, welches die Grundbedingung von Brückes Methode, das Augenleuchten zu beobachten, ist. Das Leuchten ist in solchen Fällen von Irismangel auffallender, weil die Beleuchtung der Netzhaut viel stärker ist; außerdem fehlt die Akkommodationsfähigkeit des Auges.

Endlich fanden W. Cumming[1] und Brücke[2] unabhängig voneinander das Verfahren, gesunde menschliche Augen leuchtend erscheinen zu machen, indem der Beobachter den einfallenden Lichtstrahlen nahe parallel hineinblickt. Letzterer hatte dieselbe Methode schon vorher auf die mit einem Tapetum versehenen Tieraugen angewendet. Endlich erwähnt Wharton Jones[3], daß Babbage ungefähr zu derselben Zeit ihm einen belegten Glasspiegel gezeigt habe, von dessen Belegung eine kleine Stelle weggenommen war, um Licht in das Auge zu werfen und durch die Öffnung hineinzusehen. Dies erinnert schon sehr an den Augenspiegel von Coccius; aber da Babbage keine Linsen mit seinem Spiegel verbunden zu haben scheint, so hat er höchstens ausnahmsweise von den Teilen der Netzhaut etwas erkennen können, und hat deshalb wohl seine Erfindung damals nicht veröffentlicht.

Die andere Seite der Frage warum nämlich die Teile der Netzhaut, auch wenn sie beleuchtet sind, z. B. in Tieraugen mit Tapetum, in Augen von Albinos, dem Beobachter nicht erkennbar sind, ist öfter besprochen worden. Ihre Lösung lag mehr auf der Hand. Schon im Anfange des 18. Jahrhunderts hatte Méry[4] beobachtet, daß er bei einer Katze, die er unter Wasser getaucht hatte, in den Augen, welche stark leuchtend erschienen, die Netzhautgefäße erkennen konnte. La Hire[5] gab von diesem letzteren Umstande die richtige Erklärung. Daß eine veränderte Brechung der Strahlen notwendig sei, um das Auge leuchtend erscheinen zu machen, sah er ein, aber eine nähere Erklärung weiß er nicht zu geben. Ebenso Kussmaul[6]. Letzterer zeigt, daß die Netzhaut hell und erkennbar werde, wenn man entweder vorn vom Auge die Hornhaut und Linse entfernt, oder etwas vom Glaskörper herausnimmt und dadurch die Augenachse verkürzt.

Ich selbst[7] bin, soviel ich finde, der erste gewesen, welcher sich den Zusammenhang zwischen den Richtungen der einfallenden und ausgehenden Strahlen klar machte, den wahren Grund für die Schwärze der Pupille und dadurch auch das Prinzip für die Konstruktion der Augenspiegel fand. Zur Beleuchtung wendete ich ebene unbelegte Glasplatten an, zur Erkennung der Netzhaut Konkavgläser. Th. Ruete war dagegen der erste, welcher einen durchbohrten Spiegel anwandte, und die Beobachtung durch Konvexlinsen. Da das neue Instrument in kurzer Zeit eine außerordentliche Wichtigkeit in der Augenheilkunde erreichte, sind nachher noch eine große Zahl verschiedener Formen von Augenspiegeln konstruiert worden, von denen ich oben die wichtigsten aufgeführt habe. Wesentlich neue Prinzipien für die Erleuchtung oder Erkennung der Netzhaut sind dabei aber nicht mehr gefunden worden.

Die von mir aufgestellte Theorie des Augenleuchtens und der Augenspiegel hat keine wesentlichen Veränderungen erfahren. Die Verbesserungen, welche Stellwag von Carion daran anzubringen gesucht hat, kann ich nicht als solche anerkennen. Dieser übrigens um die Einführung physikalischer Kenntnisse in seine Wissenschaft eifrig bemühte Augenarzt ist bei den hierher gehörigen Arbeiten durch falsche Grundprinzipien über die Stärke der Beleuchtung und Helligkeit durchaus irre geführt worden.

[1] *Medico-chirurgical Transactions.* XXIX. p. 284.

[2] J. Müllers Archiv für Anat. u. Physiologie. 1847. S 225.

[3] *Archives générales de Médecine.* 1854. II.

[4] *Annales de l'Acad. d. sc.* 1704.

[5] Ebenda. 1709.

[6] Die Farbenerscheinungen im Grunde des menschlichen Auges. Heidelberg 1845.

[7] H. Helmholtz, Beschreibung eines Augenspiegels zur Beobachtung der Netzhaut im lebenden Auge. Berlin 1851. Ferner in Vierordts Archiv für physiol. Heilkunde. II. 827.

1704. Méry in *Annales de l'Académie des sciences.* 1704.
1709. La Hire ebenda. 1709.
1810. Prevost in *Bibliothèque britannique.* XLV.
Gruithuisen, Beiträge zur Physiognosie und Eautognosie. S. 199.
Rudolphi, Physiologie. I. 197.
1826. J. Müller, Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. Leipzig. S. 49.
Esser in Kastners Archiv für die gesamte Naturlehre. VIII. 399.
1836. Hassenstein, De luce ex quorundam animalium oculis prodeunte atque de tapeto lucido. Jenae.
1839. Behr in Heckers Annalen. Bd. I. S. 373.
1844. E. Brücke, Über die physiologische Bedeutung der stabförmigen Körperchen. J. Müllers Archiv für Anatomie und Physiologie. 1844. S. 444*.
1845. E. Brücke, Anatomische Untersuchungen über die sogenannten leuchtenden Augen bei den Wirbeltieren. Ebenda. 1847. S. 387*.
Kussmaul, Die Farbenerscheinungen im Grunde des menschlichen Auges. Heidelberg.
1846. W. Cumming in *Medico-chirurgical Transactions.* XXIX. 284.
1847. E. Brücke, Über das Leuchten der menschlichen Augen, in J. Müllers Archiv. 1847. S. 225* u. 479*.
1851. H. Helmholtz, Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge. Berlin.
1852. Th. Ruete, Der Augenspiegel und das Optometer. Göttingen.
H Helmholtz, Über eine neue einfachste Form des Augenspiegels, in Vierordts Archiv für physiologische Heilkunde. II. 827.
Follin in *Archives générales de Médecine.* 1852. Juli.
A. Coccius, Über die Ernährungsweise der Hornhaut. Leipzig.
Froebelius, Mediz. Zeitung Rußlands. 1852. Nr. 46.
1853. A. Coccius, Über die Anwendung des Augenspiegels nebst Angabe eines neuen Instruments. Leipzig*.
A. C. van Trigt, Dissertatio de Speculo oculi. Utrecht; Nederlandsch Lancet. Ser. 3. Dl. II. 430. Deutsch mit Zusätzen von Schauenburg. Lahr 1854.
H. A. O Saemann, De speculo oculi. Regiomonti.
R. Ulrich, Beschreibung eines neuen Augenspiegels, in Henle u. Pfeuffers Zeitschrift für rationelle Medizin. Neue Folge. IV. 175*.
Meyerstein, Beschreibung eines neuen Augenspiegels. Ebenda. S. 310.
Follin et Nachet, *Mém. de la Société de Chirurgie.* 1853. III.
Spencer Wells, *Medical Times.* 1853. Sept.
1854. Donders, Verbeteringen van den oogspiegel, in Onderzoekingen gedaan in het Physiologisch Laboratorium der Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. bl. 131* u. 153*.
Anagnostakis, *Essai sur l'exploration de la rétine et des milieux de l'oeil sur le vivant au moyen d'un nouvel ophtalmoscope.* Paris 1854. (Ein durchbohrter Hohlspiegel.) Auch in *Annales d'oculistique.* Février et Mars 1854.
Stellwag von Carion, Theorie der Augenspiegel. Wien.*
G. A. Leonhard, De variis oculorum speculis illorumque usu. Leipzig.
Th. Ruete, Bildliche Darstellung der Krankheiten des menschlichen Auges. Leipzig. Lieferung 1 u. 2 auch unter dem Titel: Physikalische Untersuchung des Auges S. 23–37*.
W. Zehender, Über die Beleuchtung des innern Auges mit spezieller Berücksichtigung eines nach eigener Angabe konstruierten Augenspiegels, in Graefes Archiv für Ophthalmologie I. 1. S. 121*.
1855. Liebreich ebenda. I. 2. S. 348.
Stellwag von Carion, Zeitschrift der Ärzte zu Wien. XI. S. 65*.

Nachtrag.

Die Form des Augenspiegels, die sich schließlich am allgemeinsten bei den Augenärzten eingebürgert hat, ist der oben beschriebenen Form des Cocciusschen oder Zehenderschen Spiegels am ähnlichsten, nur mit der Änderung, daß an Stelle des ebenen oder konvexen Spiegels mit einer beleuchtenden Konvexlinse, wie sie jene Instrumente haben, ein konkaver Spiegel ohne Konvex-

linse getreten ist, von 5—6 Zoll Brennweite, 1 Zoll Durchmesser. Die Spiegel werden bald von Metall gemacht, was den Vorteil einer reineren Öffnung mit scharfen, nicht reflektierenden Rändern gibt; oder es sind belegte Glasspiegel, in der Mitte durchbohrt. Bei diesen letzteren ist die Spiegelfläche besser vor Verletzung geschützt, und sie sind auch meist heller als gewöhnliche Metallspiegel. Ein Nachteil aber ist es, namentlich für die Beleuchtung im aufrechten Bilde, daß der Rand zwischen der spiegelnden Fläche und der Öffnung nicht so schmal und scharf gemacht werden kann, wie bei den Metallspiegeln.

Die Beobachtung des eigenen Augenhintergrundes nach Coccius ist im zweiten Abschnitte beschrieben worden; es genügt dazu jeder durchbohrte, am besten ein konvexer Spiegel. Ein anderes Autophthalmoskop, in welchem das linke Auge nach der beleuchteten Netzhaut des rechten Auges hinsieht, ist von F. Heymann beschrieben worden. Durch die Öffnung eines durchbohrten Planspiegels fällt Licht in das rechte Auge; das linke blickt in Richtung der Öffnung jenes Spiegels, in welcher es ein Spiegelbild des rechten Auges sieht. Vor das rechte Auge ist, wie in Ruetes Spiegel eine Konvexlinse ($2^1/_4$ Zoll Brennweite) gesetzt, in deren Brennpunkt die Pupille jenes Auges sich befindet. Dieselbe entwirft zugleich ein umgekehrtes Bild der Netzhaut in ihrem Brennpunkte. Nach diesem Bilde ist ein reflektierendes rechtwinkliges Prisma aufgestellt, um die Strahlen gegen den durchbohrten Spiegel hinzulenken. Eine zweite Konvexlinse, die zwischen Prisma und Spiegel, sowie eine dritte, welche vor dem linken Auge steht, bilden eine Art gebrochenen kleinen Fernrohrs, durch welches das beobachtende linke Auge das Netzhautbild sieht, und durch welches auch gleichzeitig beiden Augen die Akkommodation für das Loch im Spiegel unmöglich gemacht wird.

Um die beobachtende Netzhautstelle wechseln zu können, schiebt Heymann noch ein prismatisches Brillenglas von verschiedener Stärke, dessen brechende Kante nach verschiedenen Richtungen hin gewendet werden kann, vor das beobachtende Auge.

Der binokulare Augenspiegel von Giraud Teulon ist beschrieben im dritten Abschnitte.

1855. E. Jaeger, Beiträge zur Pathologie des Auges mit Abbildungen in Farbendruck. Wien.

— Derselbe, Ergebnisse der Untersuchung des menschlichen Auges mit dem Augenspiegel. Wien. Ber. XV. 319—344.

1856. Casterani, Ophthalmoscope. *Cosmos.* VIII. 612.

— W. Zehender, Über die Beleuchtung des inneren Auges durch heterozentrische Glasspiegel. Archiv für Ophthalm. II. 2. S. 103—130.

1857. J. Porro, *La lunette panfocale, employée comme ophthalmoscope. C. R.* XLV. 103 bis 104. *Cosmos.* XI. 96—97.

— A. Burow, Über Konstruktion heterozentrischer Augenspiegel und deren Anwendung. Archiv für Ophthalm. III. 2, S. 68—80.

— Schneller, Ein Mikrometer am Augenspiegel. Ebenda. III. 2. S. 121—186.

R. Liebreich, *De l'examen de l'oeil au moyen de l'ophthalmoscope. Bruxelles* (*Extrait de la traduction du Traité pratique des maladies des yeux par* Mackenzie).

1859. A. Zander, Der Augenspiegel, seine Formen und sein Gebrauch. Leipzig u. Heidelberg.

1861. O. Becker, Über Wahrnehmung eines Reflexbildes im eigenen Auge. Wiener Med. Wochenschrift 1860. S. 670—672; 684—688. (Bildchen der hinteren Linsenfläche von der Hornhaut nach hinten reflektiert.)

1863. Burow jun., Notiz betreffend die Beobachtung des eigenen Augenhintergrundes. Archiv für Ophthalmol. IX. 1. S. 155—160.

1863. F. HEYMANN, Die Autoskopie des Auges. Leipzig.
— R. LIEBREICH, Atlas der Ophthalmoskopie. Berlin. Hirschwald.
1864. C. SCHWEIGGER, Vorlesungen über den Gebrauch des Augenspiegels. Berlin.
— A. COCCIUS, Beschreibung eines Okulars zum Augenspiegel. Archiv für Ophthalm. X. 1. S. 123—147.
— R. SCHIRMER, Über das ophthalmoskopische Bild der Macula lutea. Ebenda. X. 1. S. 148—151.
— WINTRICH, Über die Benutzung des zweckmäßig abgeblendeten zerstreuten Tageslichts zur Oto-, Ophthalmo- und Laryngoskopie. Erlanger Medic. Neuigkeiten. 1864. 9. April.

Zusatz von A. Gullstrand.

„Die von mir aufgestellte Theorie des Augenleuchtens und der Augenspiegel hat keine wesentlichen Veränderungen erfahren." Diese Worte HELMHOLTZ' gelten heute noch. Allerdings ist die Konstruktion des Instrumentes wesentlich verbessert und sein Anwendungsgebiet wesentlich erweitert worden. Der Augenarzt, welcher den Augenspiegel täglich nicht nur für die subtilsten Diagnosen von Krankheiten des Augengrundes, sondern auch zur Untersuchung der brechenden Medien und, nach verschiedenen Methoden, zur Ermittelung der Refraktion anwendet, weiß am besten HELMHOLTZ' unsterbliches Verdienst zu schätzen.

Auf die betreffenden Methoden oder deren Ergebnisse einzugehen dürfte hier nicht der Platz sein. Nur soll die Lösung eines Problems kurz erwähnt werden, welches bei der Entdeckung des Augenspiegels noch nicht aufgestellt werden konnte. Die Photographie des Augenhintergrundes, welcher bei der Empfindlichkeit der modernen Trockenplatten kein Hindernis im Wege steht, liefert nunmehr brauchbare Resultate, die wesentlich den Arbeiten DIMMERS* auf diesem Gebiete zu verdanken sind. Die vornehmlich zu überwindende Schwierigkeit bestand in der Beseitigung des Hornhautreflexes der Lichtquelle. Indem ein Teil der Pupille für die den Augengrund beleuchtenden Strahlen, ein anderer zum Durchgang des von diesem diffus reflektierten Lichtes angewendet wird, kann das vom Beleuchtungsapparat kommende, in der Hornhaut gespiegelte Licht passend abgeblendet werden. Nach ähnlichen Prinzipien hat THORNER** einen stationären, reflexlosen, WOLFF*** einen portativen elektrischen Augenspiegel konstruiert und haben beide photographische Aufnahmen des Augengrundes gemacht.

---

* FR. DIMMER, Die Photographie des Augenhintergrundes. Wiesbaden 1907.

** W. THORNER, Die Theorie des Augenspiegels und die Photographie des Augenhintergrundes. Berlin 1903.

*** H. WOLFF, Zur Photographie des menschlichen Augenhintergrundes. Arch. für Augenheilk. LIX. S. 115. 1908.

Zusätze von A. Gullstrand.

I. Die optische Abbildung.

Als Helmholtz seine grundlegenden Arbeiten über die Dioptrik des Auges veröffentlichte, herrschte allgemein die Vorstellung von einer optischen Abbildung mit solchen Eigenschaften, daß die von einem Punkt ausgegangenen Lichtstrahlen annäherungsweise in einem Punkt vereinigt würden, und daß auf diese Weise jedem Punkt eines Objektes ein Punkt des Bildes entspräche, eine Vorstellung, welche immer noch sehr verbreitet sein dürfte, obwohl sie nicht mit den nunmehr bekannten tatsächlichen Verhältnissen in Einklang gebracht werden kann. Es war zwar bekannt, daß nicht einmal die Lichtstrahlen, welche von einem auf der Achse eines zentrierten optischen Systems belegenen Punkte ausgehen, vollständig in einem Punkte vereinigt werden, sondern daß eine Aberration stattfindet, eine Abweichung, welche teils auf der verschiedenen Brechbarkeit von Lichtstrahlen verschiedener Wellenlänge beruht, die sogenannte chromatische Aberration, teils aber auch bei einfarbigem Lichte vorkommt, die sphärische Aberration, wie sie deshalb genannt wurde, weil sie von der Form der brechenden Flächen abhängig ist, und weil nur mit sphärischen Flächen gerechnet wurde. Man wußte auch, daß ein in größerem Abstande von der Achse des Instrumentes belegener Objektpunkt nicht als Punkt abgebildet wird, indem das entsprechende gebrochene Strahlenbündel astigmatisch ist, und man kannte die Formeln zur Berechnung dieses Astigmatismus. Die Konstitution des bei schiefer Inzidenz gebrochenen Strahlenbündels und die in demselben vorhandenen Abweichungen von der homozentrischen Strahlenvereinigung blieben aber ebenso unbekannt wie die allgemeinen Gesetze der optischen Abbildung, indem nur diejenigen von einem Objektpunkte ausgegangenen Strahlen berücksichtigt werden konnten, welche in der Meridianebene und in einer auf dieser senkrecht stehenden Ebene verlaufen, und welche einen verschwindend kleinen Teil der die Abbildung vermittelnden Lichtstrahlen ausmachen. Da es somit unmöglich war, die tatsächliche optische Abbildung zu untersuchen, wurde der Weg befolgt, welcher ohne Kenntnis der allgemeinen Gesetze allein zu einem System führen konnte, indem Abbe ohne Rücksicht auf die tatsächlichen Verhältnisse bei der Brechung des Lichtes die mathematischen Bedingungen für eine solche Abbildung eines Raumes in einem anderen suchte, daß jedem Punkt und jeder geraden Linie im einen Raume ein Punkt bzw. eine gerade Linie im anderen Raume entspräche. Diese Bedingungen fallen mit den schon bekannten Gesetzen der optischen Abbildung eines unendlich kleinen, auf der Achse eines zentrierten Systems belegenen Objektes bei unendlich kleiner Blendenöffnung zusammen, und die auf endlich ausgedehnte Objekte bei endlicher Blendengröße angewendete Theorie der kollinearen Abbildung, welche

heute noch den Darstellungen der Handbücher zugrunde liegt, stellt somit wesentlich eine willkürliche Erweiterung des Gültigkeitsbereiches dieser Gesetze dar, indem ein System von Fiktionen an Stelle der tatsächlichen, unbekannt gebliebenen Gesetze treten mußte. Offenbar ist, daß die Realitäten auch als Abweichungen von dem durch die kollineare Abbildung repräsentierten Ideale dargestellt werden können, wenn man sich nur stets bewußt ist, daß das Ideal nie realisiert werden kann, aber die nicht zu unterschätzende Gefahr, welche bei der stetigen Anwendung von Fiktionen darin liegt, daß die Grenze zwischen dem Wahren und dem annähernd Wahren sehr leicht überschritten werden kann, dürfte den Vorzug einer direkten Untersuchung der Realitäten klar hervortreten lassen, sobald eine solche Untersuchung durch die Ermittelung der betreffenden Gesetze ermöglicht worden ist.

Daß die Gesetze der reellen optischen Abbildung durch die Bedürfnisse der physiologischen Optik ins Leben gerufen werden mußten, beruht wohl zum Teil darauf, daß die technische Optik durch die zwar sehr zeitraubende aber relativ leicht auszuführende trigonometrische Rechnung den Realitäten näher treten und ihre jetzige, wesentlich durch die Arbeiten ABBEs und seiner Schüler ermöglichte Blütezeit erreichen konnte, während es mit den zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Mitteln tatsächlich unmöglich war, eine eingehende Kenntnis von den komplizierteren Verhältnissen bei der Abbildung im Auge zu gewinnen.

Die erforderliche Umgestaltung der Lehre von der optischen Abbildung konnte nicht an die Untersuchungen der letzten Zeit anknüpfen, da dieselben hauptsächlich mit zwei Dimensionen gearbeitet hatten, während das allgemeine Abbildungsproblem dreidimensional ist. Seit den allgemeingültigen Untersuchungen von STURM[1] und HAMILTON[2] begnügte man sich, die Konstitution des Strahlenbündels durch Größen erster und zweiter Ordnung zu bestimmen, und man vergaß außerdem immer mehr die Bedingungen, unter welchen die bei der Anwendung dieser Größen gefundenen Gesetze gültig sind. STURM hatte gefunden, daß sämtliche Strahlen eines Strahlenbündels annäherungsweise durch zwei gegeneinander senkrechte Brennlinien gehen, wenn nämlich die Blendenöffnung unendlich klein im Verhältnis zum Abstande der Brennlinien und zur Brennstrecke ist. Man vergaß aber, daß bei dem schiefen Lichteinfalle in optischen Instrumenten letzteres auch nicht annähernd der Fall ist, und daß im Auge die Brennstrecke in der Regel kleiner ist als der Durchmesser der Pupille, so daß tatsächlich die Vorstellung dieser Brennlinien grundfalsch ist. Es mußte daher zunächst durch eine vollständige Untersuchung des allgemeinen Strahlenbündels und eingehende Diskussion der Spezialfälle unter Berücksichtigung von Größen der dritten[3] und vierten[4] Ordnung, wo man sich mit solchen erster und zweiter Ordnung begnügt hatte, diese Vorstellung durch die Kenntnis

[1] CH. STURM, *Mémoire sur l'optique. Journ. de Math. pures et appliquées.* 1838. — *Mémoire sur la théorie de la vision. Comptes rendus de l'Acad. des sc.* t. XX. 1845.

[2] W. R. HAMILTON, *Theory of systems of rays. Transactions of the Royal Ir. Acad.*, vol. XV. 1828. *Supplements* ebenda vol. XVI. Tl. 1. 1830; vol. XVI. Tl. 2. 1831; vol. XVII. 1837.

[3] A. GULLSTRAND, Beitrag zur Theorie des Astigmatismus. Skand. Arch. f. Physiol. Bd. II. 1890. S. 269.

[4] Derselbe, Allgemeine Theorie der monochromatischen Aberrationen und ihre nächsten Ergebnisse für die Ophthalmologie. *Nova Acta Reg. Soc. Sc. Ups. Ser.* III. 1890.

der exakten geometrischen Größen ersetzt werden, welche die Gestalt der kaustischen Flächen sowie die Lage, Größe und Form der dünnsten Querschnitte des Strahlenbündels bestimmen. Mit Rücksicht auf den eigentümlichen, komplizierten Bau des im Auge gebrochenen Strahlenbündels war hierbei auch eine detaillierte Untersuchung der sogenannten Kreispunkte der Flächen[1] und der entsprechenden Normalenbündel erforderlich. Die mit den so gewonnenen Mitteln ausgeführte Untersuchung der Strahlenbrechung im Auge ergab aber eine so hochgradige Aberration und in Übereinstimmung damit so große Zerstreuungskreise auch bei möglichst scharfer Einstellung, daß die den dünnsten Querschnitten der Strahlenbündel zugeschriebene Rolle bei der Abbildung unmöglich der Realität entsprechen kann. Man überzeugt sich übrigens sehr leicht hiervon, wenn man mit einer Bikonvexlinse von sehr großer Öffnung das Bild des glühenden Fadens einer elektrischen Lampe auf eine weiße Fläche wirft. Das schärfste Bild der Fadenschlinge erhält man bei einer solchen Einstellung, daß es von einem Schleier umgeben erscheint, während es wesentlich schlechter ist, wenn der Abstand der Linse ein solcher ist, daß der Schleier verschwindet, wobei die Abbildung unter Verwendung des dünnsten Querschnittes des Strahlenbündels zustande kommt. Hierdurch wird bewiesen, daß die Lichtverteilung innerhalb des zur Abbildung verwendeten Strahlenbündelquerschnittes von wesentlicher, die Größe desselben von untergeordneter Bedeutung ist. Es war um so notwendiger, die durch Entwicklung in Serien gewonnenen approximativen Maße der Größe der dünnsten Querschnitte durch die die Gestalt der kaustischen Fläche bestimmenden, exakten geometrischen Größen zu ersetzen, als der Querschnitt dieser Fläche die Lichtverteilung innerhalb des Strahlenbündelquerschnittes beherrscht. Hiermit mußte notwendigerweise eine Umgestaltung des Begriffes der Blendenfunktion verknüpft werden, da die Blende nur mit Hinsicht auf die Strahlenbegrenzung behandelt worden war und deshalb als unendlich klein angenommen werden mußte, eine Fiktion, welcher keine Realität entspricht, indem bei unendlich kleiner Blendenöffnung die Diffraktionsphänomene die Erscheinungen der Abbildung vollkommen überdecken, und welche am allerwenigsten auf das Auge angewendet werden darf, wo sie durch die Größe der Blendenöffnung vollkommen illusorisch gemacht wird. Da somit das Problem eine beliebig große Blendenöffnung voraussetzen muß, so ist es nur die optische Projektion durch den Mittelpunkt derselben, welche die exakten Mittel zur Untersuchung der Blendenwirkung abgeben kann. Diese waren die Leitmotive bei der Durchführung der Untersuchung über die optische Abbildung[2] unter Ermittelung der Fundamentalgleichung, aus welcher die allgemeinen Gesetze derselben hervorgehen. Da das Auge in der Linse ein heterogenes Medium besitzt, mußten endlich auch die Gesetze der Abbildung in solchen Medien erforscht werden[3], bevor die optische Abbildung im Auge einer eingehenden Untersuchung zugänglich gemacht werden konnte.

Hier werde ich nun versuchen, das für das Verständnis der Abbildung im Auge Notwendige aus der Lehre von der optischen Abbildung herauszulesen, wobei aber, damit die Darstellung den Lesern dieses Buches verständlich sei,

[1] A. Gullstrand, Zur Kenntnis der Kreispunkte. *Acta Mathematica*. 29. 1904.

[2] Derselbe, Die reelle optische Abbildung. *Kungl. Sv. Vet. Akad. Handl.* Bd. XLI. Nr. 3. 1906.

[3] Derselbe, Die optische Abbildung in heterogenen Medien und die Dioptrik der Kristallinse des Menschen. Ebenda, Bd. XLIII. Nr. 2. 1908.

auf die Angabe der Beweise vollständig verzichtet werden soll. Man findet dieselben in den zitierten Schriften und, was die einfacheren Fragen betrifft, teilweise auch in anderen Schriften[1], wo ich mich bemüht habe, die Darstellung dem in der Differentialgeometrie nicht Bewanderten möglichst zugänglich zu machen.

Allgemeine Gesetze. Zwei Erfahrungstatsachen sind zur mathematischen Entwicklung der Gesetze der optischen Abbildung notwendig und hinreichend, nämlich die geradlinige Fortbewegung des Lichtes in homogenen Medien und das allgemeine Brechungsgesetz. Letzteres hat, wie durch eine mathematische Umformung bewiesen wird, den Inhalt, daß durch einen jeden Punkt auf einem beliebigen Strahle eines ursprünglich homozentrischen Strahlenbündels eine Fläche gelegt werden kann, auf welcher sämtliche Strahlen senkrecht stehen, und daß die optische Länge eines Strahles zwischen zwei solchen Flächen im ganzen Strahlenbündel konstant ist. Die optische Länge ist, wenn die in verschiedenen Medien gelegenen Teile des Strahles mit dem betreffenden Brechungsindex multipliziert werden, gleich der Summe der Produkte. In dieser Form ist das allgemeine Brechungsgesetz auch für heterogene Medien gültig, wo gekrümmte Linien, sogenannte Trajektorien, an Stelle der Strahlen treten, und die optische Länge durch ein definites Integral erhalten wird. Die Flächen, welche im einen wie im anderen Falle in jedem Punkt senkrecht auf die Richtung der Lichtbewegung stehen, führen gewöhnlich den Namen Wellenfläche, und ihre Normalen fallen in homogenen Medien mit den Lichtstrahlen zusammen, berühren aber in heterogenen Medien mit kontinuierlich variablem Brechungsindex die Trajektorien. Die Untersuchung der Strahlenvereinigung ist deshalb allgemein gleichbedeutend mit der Untersuchung der Konstitution eines Normalenbündels, welche sich wiederum aus der Form der betreffenden Fläche ergibt. Es lassen sich aber die Flächen nur in wenigen einfacheren und für die praktischen Bedürfnisse belanglosen Fällen durch algebraisch anwendbare Gleichungen darstellen, und man ist daher darauf angewiesen, die Fläche in der nächsten Umgebung eines ausgewählten Punktes, das Strahlenbündel in der nächsten Umgebung eines ausgewählten Strahles zu untersuchen. Das von einem Objektpunkte ausgegangene Strahlenbündel enthält einen Strahl, welcher im Blendenraume durch das Blendenzentrum geht, und welcher Hauptstrahl genannt wird. Sämtliche Hauptstrahlen bilden somit zusammen ein im Blendenraume homozentrisches Strahlenbündel, welches sich genau so verhält, wie wenn das Blendenzentrum Licht ausstrahlte. Auf dieselbe Weise wie ein Strahlenbündel nur in der nächsten Umgebung eines ausgewählten Strahles, kann die Abbildung eines Objektes nur in der nächsten Umgebung eines ausgewählten Objektpunktes untersucht werden. Der diesem ausgewählten Objektpunkte zugehörige Hauptstrahl wird der zentrale Strahl oder der Leitstrahl genannt. Die Gesetze der optischen Abbildung ergeben sich nun durch Untersuchung des zentralen Objektstrahlenbündels und des Hauptstrahlenbündels in der

[1] Die Konstitution des im Auge gebrochenen Strahlenbündels. Arch. f. Ophth. LIII, 2. 1901. S. 105. — Über Astigmatismus, Koma und Abberration. Ann. d. Physik, 4. Folge. 18. 1905. S. 941. — Tatsachen und Fiktionen in der Lehre von der optischen Abbildung. Arch. f. Optik. I. 1907. S. 2.

nächsten Umgebung des Leitstrahles sowie durch Untersuchung der demselben am nächsten verlaufenden Objektstrahlenbündel in der nächsten Umgebung der betreffenden Hauptstrahlen und werden die Gesetze erster oder höherer Ordnung genannt, je nachdem sie durch ein- oder mehrmalige Ableitung aus dem allgemeinen Brechungsgesetze erhalten werden. Wegen der Kompliziertheit des Problems sind im allgemeinen Falle nur die Gesetze erster Ordnung anwendbar, so daß die betreffenden Formeln, wenn es sich um ausgedehnte Objekte handelt, längs so vielen, willkürlich gewählten Leitstrahlen angewendet werden müssen, wie es die zu erzielende Kenntnis der betreffenden Abbildung erfordert.

Die Gesetze erster Ordnung der Strahlenvereinigung ergeben sich aus der allgemeinen Konstitution des Strahlenbündels unter Anwendung der STURMschen Formeln, durch welche die betreffenden, die Wellenfläche des gebrochenen Strahlenbündels bestimmenden Größen erhalten werden, wenn das einfallende Strahlenbündel und die brechende Fläche bekannt sind. Die Eigenschaft des Strahlenbündels als Normalenbündel bedingt allgemein, daß ein beliebiger Strahl desselben entweder nur in einem oder aber in zwei getrennten Punkten von nächstliegenden Strahlen geschnitten wird. Letzteres stellt den allgemeinen, ersteres einen singulären Fall dar. Längs einem willkürlich gewählten Strahle ist deshalb das Strahlenbündel allgemein astigmatisch mit zwei Fokalpunkten, während es, wenn auf einem Strahle die beiden Fokalpunkte zusammenfallen, längs diesem Strahle anastigmatisch ist. Wird im allgemeinen Strahlenbündel einer der Fokalpunkte als der erste gewählt, so wird die Ebene, in welcher die dem ausgewählten Strahle nächstliegenden Strahlen verlaufen, welche ihn in diesem Fokalpunkte schneiden, der erste Hauptschnitt des Strahlenbündels längs diesem Strahle genannt, und die Linie, welche im ersten Fokalpunkt senkrecht auf diesem Hauptschnitt steht, heißt die erste Fokallinie. Auf dieselbe Weise wird der ausgewählte Strahl im zweiten Fokalpunkte von nächstliegenden Strahlen geschnitten, welche in dem auf dem ersten Hauptschnitte senkrecht stehenden zweiten Hauptschnitte des Strahlenbündels längs dem fraglichen Strahle verlaufen, und steht die zweite Fokallinie im zweiten Fokalpunkt senkrecht auf dem zweiten Hauptschnitte. Ein Strahl, längs welchem das Strahlenbündel astigmatisch ist, wird demnach nur von denjenigen nächstliegenden Strahlen geschnitten, welche in den beiden Hauptschnitten enthalten sind, während wenn der Astigmatismus längs dem fraglichen Strahle behoben ist, so daß die beiden Fokalpunkte in einen zusammenfallen, derselbe in diesem Punkt bis auf unendlich kleine Größen höherer Ordnung als der ersten von sämtlichen nächstliegenden Strahlen geschnitten wird.

Es ändern sich nun allgemein von Strahl zu Strahl sowohl die Fokalpunkte wie die Hauptschnitte, wobei sämtliche ersten Fokalpunkte auf einer Fläche, der ersten kaustischen Fläche liegen, und die zweite kaustische Fläche auf dieselbe Weise aus sämtlichen zweiten Fokalpunkten des Strahlenbündels besteht. Diese Flächen führen auch den Namen der ersten bzw. zweiten Schale der kaustischen Fläche. Aus diesem Baue des Strahlenbündels geht es hervor, daß eine Zusammenbrechung sämtlicher Strahlen in einen Punkt einen singulären Fall darstellt, sowie daß die Strahlenvereinigung allgemein nur nächstliegende Strahlen betrifft und nur auf den kaustischen Flächen vorkommt. Zieht man auf einer, ein Strahlenbündel schneidenden Fläche eine Linie, so bilden sämtliche Strahlen, welche diese Linie schneiden, eine

Strahlenfläche. Auf dieselbe Weise wie ein Strahlenbündel wird eine Strahlenfläche längs einem ausgewählten Strahle untersucht. Es ergibt sich, daß die diesen Strahl enthaltende Tangentialebene der Strahlenfläche, wenn man von unendlich großem negativen zu unendlich großem positiven Abstande längs demselben fortschreitet, entweder eine kontinuierliche, 180° betragende, Drehung erfährt, oder aber unverändert dieselbe bleibt. Im ersteren Falle ist die Strahlenfläche windschief längs dem fraglichen Strahle, und fällt die Tangentialebene in den beiden auf demselben belegenen Fokalpunkten mit den ungleichnamigen Hauptschnitten zusammen, so daß allgemein die beiden, einem beliebigen Strahle zugehörigen Fokallinien jede, denselben Strahl enthaltende windschiefe Strahlenfläche berühren. In dem Falle, wo die Tangentialebene einer Strahlenfläche längs einem Strahle unverändert bleibt, fällt diese Ebene mit einem Hauptschnitte des Strahlenbündels längs demselben Strahle zusammen, und wird dieser im betreffenden Fokalpunkte bis auf unendlich kleine Größen höherer Ordnung als der ersten von den nächstliegenden Strahlen der Strahlenfläche geschnitten. Da die Strahlenfläche somit auf dem betreffenden Strahle einen Fokalpunkt besitzt, stellt sie längs demselben eine fokale Strahlenfläche dar. Im Fokalpunkte ist die Tangentialebene unbestimmt, und wird daher die Strahlenfläche von jeder den betreffenden Strahl enthaltenden Ebene berührt, so daß auch die längs einem bestimmten Strahle fokalen Strahlenflächen allgemein von den beiden diesem Strahle zugehörigen Fokallinien berührt werden. Ist das Strahlenbündel längs einem Strahle anastigmatisch, so ist jede diesen Strahl enthaltende Strahlenfläche längs demselben fokal, und treten an Stelle der Fokallinien zwei beliebige durch den Fokalpunkt senkrecht auf denselben und aufeinander gezogene Linien. Es geht hieraus hervor, daß die allgemeine Konstitution des reellen Strahlenbündels dadurch definiert ist, daß jede, einen beliebigen Strahl enthaltende Strahlenfläche von den beiden demselben zugehörigen aufeinander und auf demselben senkrecht stehenden Fokallinien berührt wird. Da die Schnittlinie einer Strahlenfläche mit der in einem Fokalpunkte senkrecht zum betreffenden Strahl gelegten Ebene, der bezüglichen Fokalebene, eine beliebige Krümmung haben kann, so leuchtet es ohne weiteres ein, daß die Fokallinie erst dann zu einer Brennlinie werden kann, wenn dieselbe durch Verengerung der Blende derart verkürzt wird, daß man sie nicht mehr von einem Stücke einer beliebig gekrümmten Linie unterscheiden kann. Die allgemeine Konstitution des Strahlenbündels kann auch dadurch definiert werden, daß die beiden einem beliebigen Strahle zugehörigen Fokallinien von sämtlichen nächstliegenden Strahlen bis auf unendlich kleine Größen höherer Ordnung als der ersten geschnitten werden, wobei man aber die exakte Definition eines nächstliegenden Strahles vor Augen haben muß. Wenn man sich auf einer Strahlenfläche dem ausgewählten Strahle nähert, indem man zunächst in einem in endlichem Abstande belegenen Punkte den bezüglichen Strahl zieht, dann dieselbe Prozedur in immer kürzerem Abstande wiederholt, so zieht man den nächstliegenden Strahl eben in dem Augenblicke, wo der Abstand gleich Null wird. Man mißversteht jedoch diese Definition vollkommen, wenn man aus derselben den Schluß zieht, daß sämtliche Strahlen eines endlich dünnen Strahlenbündels annäherungsweise durch zwei STURMsche Brennlinien gehen.

Da im Fokalpunkte eines längs einem bestimmten Strahle anastigmatischen Strahlenbündels dieser Strahl von sämtlichen nächstliegenden Strahlen bis auf

unendlich kleine Größen höherer Ordnung als der ersten geschnitten wird, so besteht hier eine vollständige Strahlenvereinigung erster Ordnung, und ist der Fokalpunkt die optische Abbildung des Punktes, von welchem das Licht ausgegangen ist. Die optische Abbildung kommt somit bei endlicher Blende nicht etwa dadurch zustande, daß sämtliche vom Objektpunkte ausgegangenen Strahlen annähernd durch den Bildpunkt gehen, sondern nur dadurch, daß nächstliegende Strahlen sich im Bildpunkt schneiden, wodurch die Lichtkonzentration in diesem Punkte unendlich groß wird im Verhältnis zu einem in endlichem Abstande von demselben belegenen Punkte. Ersterer Abbildungsmodus ist zwar für ein unendlich dünnes Strahlenbündel mathematisch richtig, aber da die optische Abbildung durch solche Strahlenbündel wegen der Beugung des Lichtes physikalisch unmöglich ist, stellt er nur das seit alters her geträumte Ideal dar, während letzterer den tatsächlichen Vorgang exakt angibt. Daß die Realität hierbei dem Ideale wenig nachsteht, beruht darauf, daß sowohl im Auge wie auf der photographischen Platte Helligkeitsunterschiede von größerer Bedeutung sind als die absoluten Helligkeiten.

Das Kriterium der wirklichen optischen Abbildung ist eben die vollständige Strahlenvereinigung erster Ordnung. Der mathematischen Untersuchung ist, wie aus dem Obenstehenden erhellt, diese Strahlenvereinigung nur längs bestimmten Strahlen zugänglich. Als solche werden die oben definierten Hauptstrahlen gewählt. Denkt man sich in jedem Punkte einer Objektfläche den Hauptstrahl gezogen und durch trigonometrische Rechnung durch das optische System verfolgt, und stellt man irgendwo im Wege des Lichtes eine Schirmfläche auf, so wird auf derselben eine punktuelle Korrespondenz mit der Objektfläche durch die optische Projektion vermittelt, indem ein beliebiger Punkt die optische Projektion des auf demselben Hauptstrahle liegenden Objektpunktes darstellt, und das Projektionszentrum vom Blendenzentrum repräsentiert wird. Die optische Projektion ist somit eine mathematische Konzeption, kann aber beim Vorhandensein einer sehr hellen Objektfläche durch ein beliebiges optisches System physikalisch illustriert werden, wenn der Schirm so aufgestellt wird, daß die Objektfläche nicht scharf abgebildet erscheint, indem jedem hellen Objektpunkte ein heller Lichtfleck auf dem Schirme entspricht, und bei zunehmender Verengerung der Blende ein immer weniger verschwommenes Bild sichtbar wird. Ein spezieller Fall der allgemeinen optischen Projektion wird durch die Lochkamera versinnlicht. Allgemein ist somit jeder Schnittpunkt eines Hauptstrahles mit einer beliebig angebrachten Schirmfläche die optische Projektion des entsprechenden Objektpunktes und jede Schnittlinie einer Hauptstrahlenfläche die optische Projektion der entsprechenden Objektlinie, wobei das Verhältnis der Linienelemente der Projektion und der Objektlinie, wenn beide auf dem betreffenden Hauptstrahl senkrecht stehen, den linearen Projektionskoeffizienten darstellt. Auf dieselbe Weise kann eine optische Projektion durch das von einem Objektpunkte ausgegangene Strahlenbündel vermittelt werden, welche man dadurch physikalisch nachahmt, daß man irgendwo in einem optischen Systeme mit großer Öffnung in den Weg des von einem leuchtenden Punkte ausgegangenen Lichtes einen Draht hält, und den dadurch entstehenden Schatten auf einem in einem beliebigen Medium aufgestellten Schirme beobachtet. Hält man dabei den Draht in das Medium, in dem sich der Lichtpunkt befindet, und dreht man ihn um den Hauptstrahl, bis der Schatten auf dem Schirme den einen Hauptschnitt des Strahlenbündels

längs dem Hauptstrahle berührt, so ist die durch den Draht versinnlichte Strahlenfläche sowohl im Objektraume wie im Schirmraume längs dem Hauptstrahl fokal, da im Objektraume jede Strahlenfläche einen Fokalpunkt im leuchtenden Punkte hat. In diesem speziellen Falle kann der lineare Projektionskoeffizient durch den angulären Projektionskoeffizienten ersetzt werden, welcher das Verhältnis der unendlich kleinen Winkel angibt, unter welchen die Linienelemente der Projektion und der von dem Drahte versinnlichten Linie vom Fokalpunkte der betreffenden Strahlenfläche aus gesehen werden.

Da die anastigmatische Strahlenvereinigung allgemein nur längs singulären Hauptstrahlen vorkommt, so ist eine punktuelle optische Abbildung von solcher Beschaffenheit, daß die einzelnen Punkte einer Objektfläche unter vollständiger Strahlenvereinigung erster Ordnung in Punkte abgebildet werden, bei fixem Blendenzentrum eine mathematische Unmöglichkeit, und kann es sich, wenn eine allgemeine optische Abbildung wirklich existiert, nur um eine Abbildung einzelner Linien handeln. Das Kriterium der optischen Abbildung von Linien ist, daß die optische Projektion der Objektlinie von sämtlichen, von den verschiedenen Punkten dieser Linie ausgegangenen, den betreffenden Hauptstrahlen nächstliegenden Strahlen bis auf unendlich kleine Größen höherer Ordnung als der ersten geschnitten wird. Da bei dieser Abbildung keine andere punktuelle Korrespondenz vorhanden ist als die durch die optische Projektion vermittelte, sondern die von einem Punkte der Objektlinie ausgegangenen Strahlen die Bildlinie in verschiedenen Punkten treffen, so leuchtet es ein, daß das Verhältnis der Linienelemente der Bildlinien und abbildbaren Linien nur durch die optische Projektion bestimmt wird, während der der optischen Abbildung entsprechende Vergrößerungskoeffizient das Verhältnis der Linienelemente der die Bildlinien und die abbildbaren Linien senkrecht schneidenden Linien, der orthogonalen Trajektorien derselben, angibt, und zwar unter der Annahme, daß Objekt- und Bildfläche auf dem Hauptstrahl senkrecht stehen. Der Vergrößerungskoeffizient würde also mit dem linearen Projektionskoeffizienten der orthogonalen Trajektorien zusammenfallen, wenn diese allgemein ineinander projiziert werden könnten.

Durch meine Fundamentalgleichung der optischen Abbildung wird die Existenz einer allgemeinen Abbildung von Linien bewiesen und ergeben sich die Gesetze derselben. Ich habe diese Grundgesetze der allgemeinen optischen Abbildung, welche für ein beliebiges optisches System mit isotropen Medien, in welchen der Brechungsindex konstant oder kontinuierlich variabel ist, unbeschränkte Gültigkeit besitzen, sobald streifende Inzidenz der Hauptstrahlen sowie Spitzen und Kanten an den Inzidenzpunkten ausgeschlossen sind, auf folgende Weise formuliert.

Auf einer beliebigen Objektfläche gehen durch jeden Punkt, in welchem dieselbe unter endlichem Winkel vom Hauptstrahle geschnitten wird, zwei, einen endlichen Winkel miteinander bildende Linien, welche unter vollständiger Strahlenvereinigung erster Ordnung, jedes System auf einer anderen Bildfläche, im Bildraume abgebildet werden.

Die Tangenten der abbildbaren Linien liegen überall in den Normalebenen derjenigen Strahlenflächen, welche im Bildraume die Hauptschnitte des gebrochenen Strahlenbündels berühren. Die Tangenten der Bildlinien liegen in den auf diesen Hauptschnitten senkrecht stehenden Hauptschnitten derselben Strahlenbündel.

Eine andere Abbildung unter vollständiger Strahlenvereinigung erster Ordnung gibt es nicht. Nur die singulären Punkte der Systeme abbildbarer Linien werden in Punkten abgebildet. Diese Systeme haben nur dort singuläre Punkte, wo das Strahlenbündel nach der Brechung im Bildraume längs dem Hauptstrahl anastigmatisch ist, und die beiden Bildflächen einen Berührungspunkt haben.

Die Vergrößerung kann nur durch das Verhältnis der Abstände der Bildlinien und der entsprechenden abbildbaren Linien ausgedrückt werden. In den singulären Punkten kann jedoch das erste Glied der Vergrößerung durch das Verhältnis der Linienelemente einer Bildlinie und einer abbildbaren Linie ausgedrückt werden, und die Vergrößerung einer aus singulären Punkten bestehenden Linie kann durch das Längenverhältnis der Bild- und Objektlinie dargestellt werden.

Das Produkt des relativen Brechungsindex des optischen Systems mit dem bezüglichen angulären Projektionskoeffizienten und dem Vergrößerungskoeffizienten ist stets gleich der Einheit.

In jedem Punkte sind die Vergrößerungskoeffizienten und die Richtungen der Tangenten der abbildbaren Linien von der Lage der Blende auf dem Hauptstrahl unabhängig.

Abbildungen können im allgemeinen Falle nicht zusammengesetzt werden. Wenn ein anderes Medium als Bildraum gewählt wird, so ändern sich dabei die abbildbaren Linien. Dasselbe ist der Fall, wenn der Abstand des Objektpunktes vom optischen System verändert wird.

Die Abbildungen sind bedingungslos umkehrbar. Bei der Umkehrung des Strahlenganges stellen die früheren Bildlinien das eine System der auf der betreffenden Fläche verlaufenden abbildbaren Linien dar, und die Tangenten der entsprechenden früheren abbildbaren Linien liegen in den bezüglichen Hauptschnitten der gebrochenen Strahlenbündel.

Die so charakterisierte optische Abbildung ist eine mathematische Konzeption, welche an ein fixes Blendenzentrum und an monochromatisches Licht gebunden ist. Bei der Anwendung der Abbildungsgesetze auf physikalische Verhältnisse hat man deshalb zunächst darauf Rücksicht zu nehmen, daß als Blendenzentrum streng genommen jeder beliebige in der Blendenebene belegene Punkt willkürlich gewählt werden kann, worauf betreffs der praktisch wichtigen Fälle weiter unten eingegangen werden soll. Bei zusammengesetztem Lichte hat man dann auch noch die chromatischen Differenzen in Rechnung zu ziehen. Diese betreffen nicht nur die den Verlauf des Leitstrahles bestimmenden durch trigonometrische Rechnung gewonnenen Größen, sondern auch die Lage der Bildlinien, die Orientierung derselben und der abbildbaren Linien, sowie endlich die Vergrößerungskoeffizienten, indem sämtliche Größen je nach Bedarf für verschiedene Lichtarten berechnet werden. Hierzu dienen teils die STURMschen Formeln, welche ich für die unberücksichtigt gebliebenen singulären Fälle komplettiert habe, teils andere von mir deduzierte Formeln.

Wenn längs einem Leitstrahle die Einfallsebene überall eine Hauptnormalebene der brechenden Fläche darstellt, und jede folgende Einfallsebene entweder mit der vorhergehenden Brechungsebene zusammenfällt oder senkrecht auf derselben steht, können die Abbildungen zusammengesetzt werden, indem überall die Tangenten der abbildbaren Linien und der Bildlinien in der Brechungsebene bzw. in der auf derselben senkrechten, den Leitstrahl enthaltenden Ebene liegen. Einen praktisch wichtigen speziellen Fall hiervon stellen die einfach asymmetrischen Systeme dar, welche durch das Vorhandensein einer Symmetrieebene charakterisiert sind. Während im allgemeinen Fall, wo keine solche

Ebene sich vorfindet, und das optische System deshalb doppelt asymmetrisch genannt wird, nur die Abbildungsgesetze erster Ordnung anwendbar sind, habe ich für die erstgenannten Systeme die vollständigen Gesetze zweiter Ordnung ermittelt. Stellt wiederum der Leitstrahl die Schnittlinie von zwei Symmetrieebenen des optischen Systems dar, so wird dasselbe ein symmetrisches System genannt, und kennt man auf dieselbe Weise längs dem Leitstrahl die Gesetze dritter Ordnung, welche früher für den speziellen Fall eines aus sphärischen Flächen bestehenden zentrierten Systems von SEYDEL deduziert worden waren. Die Gesetze erster Ordnung werden überdies sowohl im einfach asymmetrischen wie noch mehr im symmetrischen System wesentlich einfacher. Besteht wiederum das optische System aus Umdrehungsflächen mit gemeinsamer Achse, auf welcher das Blendenzentrum belegen ist, und gilt dasselbe von der Objektfläche, oder stellt diese eine achsensenkrechte Ebene dar, so liegt ein Umdrehungssystem vor. Solche Systeme, von welchen die aus zentrierten sphärischen Flächen bestehenden einen speziellen Fall darstellen, haben erstens eine vor allen anderen hervorragende praktische Bedeutung und bieten zweitens beträchtliche Vereinfachungen der Abbildungsgesetze dar. Da nämlich überall die Ebene, welche den Hauptstrahl und die Umdrehungsachse enthält, eine Symmetrieebene darstellt, so muß die eine der abbildbaren Linien und der Bildlinien überall in dieser Ebene liegen, die andere überall auf derselben senkrecht stehen. Es folgt hieraus einerseits, daß abbildbare Linien und Bildlinien überall Parallelkreise und Meridiane darstellen, indem auch die Bildflächen Umdrehungsflächen sein müssen, anderseits aber auch, daß die Abbildungen längs jedem Hauptstrahle zusammensetzbar sind.

Die praktische Tragweite dieser Einteilung der Systeme wird beim Vergleich der Abbildung mittels einer gewöhnlichen und einer bizylindrischen Lupe leicht verstanden. In der letzteren gelten längs der Achse die Gesetze der symmetrischen, längs einem in einer der beiden Symmetrieebenen belegenen Leitstrahle die Gesetze der einfach asymmetrischen Systeme, aber längs jedem anderen Leitstrahle nur die allgemeinen bei doppelter Asymmetrie gültigen Gesetze. In einer gewöhnlichen Lupe gelten aber, wenn die Pupille des Beobachters auf der Achse liegt, längs der Achse die besonderen für Umdrehungssysteme gültigen Gesetze und längs jedem anderen Hauptstrahle die Gesetze einfach asymmetrischer Systeme mit besonderen, auf den Eigenschaften der Umdrehungsflächen beruhenden Vereinfachungen.

Die optische Abbildung in Umdrehungssystemen. Die einfacheren für diese Systeme gültigen Gesetze können mit elementaren Mitteln dargestellt werden und reichen auch zum Verständnis der Abbildung im Auge aus. In dem von einem Objektpunkte ausgegangenen Strahlenbündel ist die durch den Hauptstrahl und die Umdrehungsachse gelegte Meridionalebene der erste, die senkrecht auf derselben durch den Hauptstrahl gelegte Äquatorealebene der zweite Hauptschnitt. Da die Strahlenflächen, welche im Objektraume diese Ebenen berühren, in jedem Medium dasselbe Verhalten zeigen und somit überall fokal sind, so genügt die Untersuchung dieser Strahlenflächen, um die gebrochenen Strahlenbündel kennen zu lernen. Daß auch die vollständigen Abbildungsvorgänge bei alleiniger Rücksichtnahme auf diese beiden Strahlen-

flächen ermittelt werden, geht erst aus den oben mitgeteilten Gesetzen der allgemeinen optischen Abbildung hervor, denn ohne dieselben kennt man tatsächlich nur die Einwirkung der in diesen beiden Strahlenflächen verlaufenden Strahlen, welche einen verschwindend kleinen Teil der bei der Abbildung wirksamen Strahlenmenge ausmachen.

Es sei in der Fig. 114 AC die Verlängerung des im Inzidenzpunkte A einfallenden Hauptstrahles, BC die Verlängerung eines anderen, demselben Strahlenbündel angehörigen, in der Meridionalebene verlaufenden Strahles, AO und BO die Normalen der brechenden Fläche. Der Einfallswinkel CAO sei mit i, der Einfallswinkel CBO mit $i + \omega$ bezeichnet. Es ist dann

Fig. 114.

$$\wedge AOB + i = \wedge ACB + i + \omega$$

und somit

$$\omega = \wedge AOB - \wedge ACB.$$

Wird nun B immer näher dem Punkte A gebracht, bis BC einen dem Hauptstrahle nächstliegenden Strahl darstellt, so stellt AC den in A gemessenen ersten Fokalabstand τ des einfallenden Strahlenbündels, AO den ersten Hauptkrümmungsradius $\varrho_{,}$ der brechenden Fläche dar, und es wird $\wedge AOB = \frac{AB}{\varrho_{,}}$ sowie $\wedge ACB = \frac{AB\cos i}{\tau}$. Es resultiert somit, wenn AB unendlich klein ist:

$$\frac{\omega}{AB} = \frac{1}{\varrho_{,}} - \frac{\cos i}{\tau},$$

und auf dieselbe Weise, wenn $i'\omega'\tau'$ die analoge Bedeutung für das gebrochene Strahlenbündel haben

$$\frac{\omega'}{AB} = \frac{1}{\varrho_{,}} - \frac{\cos i'}{\tau'}.$$

Nun ist aber allgemein

$$\sin(i + \omega) = \sin i \cos \omega + \sin \omega \cos i,$$

welche Gleichung, da ω gleichzeitig mit AB unendlich kleine Werte und schließlich den Wert Null erhält, und da hierbei $\cos \omega = 1$ sowie $\sin \omega = \omega$ wird, nach Multiplikation mit dem Brechungsindex n des ersten Mediums und Division mit AB die Form

$$\frac{n \sin(i + \omega) - n \sin i}{AB} = n \cos i \frac{\omega}{AB} = n \cos i \left(\frac{1}{\varrho_{,}} - \frac{\cos i}{\tau}\right)$$

annimmt. Auf dieselbe Weise erhält man, wenn n' der Brechungsindex des zweiten Mediums ist,

$$\frac{n' \sin(i' + \omega') - n' \sin i'}{AB} = n' \cos i' \left(\frac{1}{\varrho_{,}} - \frac{\cos i'}{\tau'}\right).$$

Da die linken Membra dieser beiden Gleichungen einander gleich sind, so ergibt sich

$$\frac{n' \cos^2 i'}{\tau'} = \frac{n \cos^2 i}{\tau} + \frac{n' \cos i' - n \cos i}{\varrho_{,}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad A_1.$$

Wenn es sich um eine Spiegelung handelt, so gilt identisch dieselbe Beweisführung, wenn $n' = -n$ gesetzt wird, indem dabei die linken Membra der beiden letzten Gleichungen fortwährend identisch sind. In beiden Fällen sind in der Formel A_1 die Größen $\tau\,\tau'\,\varrho_{,}$ stets in einer und derselben Richtung vom Inzidenzpunkte aus positiv zu rechnen.

Wiederum sei in der Fig. 115 B der auf der Verlängerung des Hauptstrahles belegene zweite Fokalpunkt des einfallenden Strahlenbündels, O der auf der im Inzidenzpunkte A errichteten Normale belegene zweite Krümmungsmittelpunkt der brechenden Fläche, und es werde die ganze Figur um die Linie OB als Achse gedreht. Beim Beginn dieser Drehung kommt man vom Punkte A zunächst auf den in der Äquatorealebene nächstliegenden Punkt der brechenden Fläche. Die in diesem Punkte errichtete Flächennormale ist dann der Normale AO nächstliegend und schneidet folglich dieselbe im Punkte O. Auf dieselbe Weise ist der in diesem Punkte einfallende Strahl dem Hauptstrahle AB nächstliegend und schneidet denselben im Punkte B. Da nun aber der dem gebrochenen Hauptstrahle in der Äquatorealebene nächstliegende Strahl in derselben Ebene liegen muß wie der einfallende Strahl und die Normale, so muß er die Linie OB schneiden, wonach der zweite Fokalpunkt auf dem gebrochenen Hauptstrahle im Schnittpunkte B' desselben mit der Linie OB liegt.

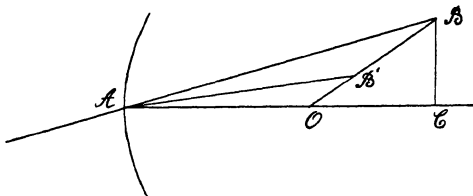


Fig. 115.

Werden nun die im Inzidenzpunkte gemessenen zweiten Fokalabstände bzw. der zweite Krümmungsradius der brechenden Fläche mit $\varsigma\,\varsigma'\,\varrho_{,,}$ bezeichnet und die Linie BC senkrecht auf der Flächennormale gezogen, so ist

$$\frac{BC}{OC} = \frac{\varsigma \sin i}{\varsigma \cos i - \varrho_{,,}} = \operatorname{tg} \wedge BOC$$

und folglich

$$\frac{n \sin i}{\varrho_{,,} \operatorname{tg} \wedge BOC} = \frac{n \cos i}{\varrho_{,,}} - \frac{n}{\varsigma}$$

mithin, da auf dieselbe Weise die analoge Gleichung für das gebrochene Strahlenbündel erhalten wird, und da die linken Membra beider Gleichungen einander gleich sind,

$$\frac{n'}{\varsigma'} = \frac{n}{\varsigma} + \frac{n' \cos i' - n \cos i}{\varrho_{,,}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad A_2.$$

Von einer Spiegelung, wie von der Richtung, in welcher die Größen $\varsigma\,\varsigma'\,\varrho_{,,}$ positiv zu rechnen sind, gilt das oben von der Formel A_1 Gesagte. Beide Formeln gelten, wie aus der Deduktion hervorgeht, nicht nur in Umdrehungssystemen, sondern überall, wo ein Hauptschnitt des einfallenden Strahlenbündels und eine Hauptnormalebene der brechenden bzw. spiegelnden Fläche mit der Einfallsebene zusammenfällt. Dieselben lehren zunächst, daß das gebrochene Strahlenbündel allgemein astigmatisch ist, so daß in Umdrehungssystemen — singuläre Fälle ausgenommen — die Bildflächen einander nur im Schnittpunkte mit der Umdrehungsachse berühren und folglich nur der axiale Objektpunkt als Punkt abgebildet wird.

Für diesen Punkt ist $\cos i = \cos i' = 1$ und $\varrho_{,} = \varrho_{,,}$, wonach die Formeln A in die erste der im HELMHOLTZschen Text S. 51 deduzierten Formeln 3) übergehen. In dieser ist nämlich, älterem Gebrauche gemäß, der Fokalabstand des einfallenden Strahlenbündels in umgekehrter Richtung wie der Fokalabstand des gebrochenen Strahlenbündels und der Krümmungsradius der brechenden Fläche positiv gerechnet.

In bezug auf jeden anderen Objektpunkt hat man aber mit zwei verschiedenen Abbildungen zu rechnen. Hierbei sei die Abbildung der Parallelkreise, welche durch die ersten Fokalpunkte der gebrochenen Strahlenbündel bestimmt wird, als die erste Abbildung bezeichnet.

Die den beiden Abbildungen entsprechenden Vergrößerungskoeffizienten werden, indem $p\,q\,p'q'$ die im Inzidenzpunkte gemessenen ersten bzw. zweiten Fokalabstände des einfallenden und gebrochenen Hauptstrahlenbündels bezeichnen, auf folgende Weise ermittelt.

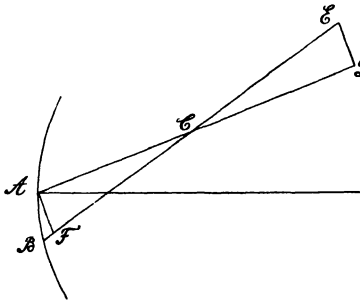


Fig. 116

In der Fig. 116 sei ACD der verlängerte Hauptstrahl des einfallenden Strahlenbündels, C der erste Fokalpunkt des Hauptstrahlenbündels und D der erste Fokalpunkt des dem betreffenden Objektpunkte angehörigen Strahlenbündels. Es sei die Linie DE senkrecht auf den Hauptstrahl gezogen und es stelle BE den durch den Punkt E gehenden Hauptstrahl dar. F ist der Schnittpunkt desselben mit der im Punkte A senkrecht auf ACD stehenden Linie. Allgemein ist nun

$$\frac{AF}{DE} = \frac{AC}{CD} = \frac{p}{\tau - p}.$$

Wird nun der Punkt E infinite dem Fokalpunkte D genähert, bis der Hauptstrahl BE ein dem Hauptstrahle AD nächstliegender wird, so kommt B auf der Tangente der brechenden Fläche zu liegen, so daß der Winkel BAF gleich dem Inzidenzwinkel wird. Es ist dann, wenn DE mit β bezeichnet wird,

$$AB = \frac{\beta p}{(\tau - p)\cos i},$$

und wenn mit $n \cos^2 i \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{p}\right)$ multipliziert wird,

$$AB \cdot n \cos^2 i \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{p}\right) = -\frac{n \cos i\, \beta}{\tau}.$$

Da auf ganz identische Weise die analoge Gleichung zwischen den das gebrochene Objektpunkt- und Hauptstrahlenbündel bestimmenden Größen erhalten wird, und durch die Anwendung der Gleichung A_1 auf beide Strahlenbündel die Identität der linken Membra beider Gleichungen bewiesen wird, so resultiert, wenn K_1 den ersten Vergrößerungskoeffizienten darstellt,

$$K_1 = \frac{n \cos i\, \tau'}{n' \cos i'\, \tau} \quad \dots\dots\dots\dots \quad B_1.$$

Auf dieselbe Weise erhält man für den zweiten Vergrößerungskoeffizienten

$$K_2 = \frac{n\varsigma'}{n'\varsigma} \qquad \mathrm{B}_2$$

indem, wenn die Fig. 116 den Äquatorialschnitt darstellte, der Hauptstrahl des einfallenden Strahlenbündels mit der Normale der Schnittlinie der brechenden Fläche zusammenfallen müßte, und anstatt der oben ausgeführten Multiplikation dieselbe mit $n\left(\frac{1}{\varsigma} - \frac{1}{q}\right)$ zu bewerkstelligen ist.

Im Spezialfalle $\tau = \tau' = 0$ ist in der Fig. 116 $AF = \beta$ und somit $K_1 = \frac{\cos i'}{\cos i}$. Für $\varsigma = \varsigma' = 0$ ergibt sich unmittelbar $K_2 = 1$.

Da die Formeln A Additionsformeln darstellen, in welchen die mit dem betreffenden Brechungsindex multiplizierten reziproken Werte der Fokalabstände eingehen, so empfiehlt es sich, bei der Anwendung derselben direkt mit diesen Werten zu rechnen. Zu diesem Zwecke wird der mit dem Brechungsindex dividierte in einem beliebigen Punkte gemessene Fokalabstand der reduzierte Fokalabstand genannt. Da der Fokalabstand positiv gerechnet wird, wenn man vom letztgenannten Punkte in der als positiv bezeichneten Richtung zum Fokalpunkte gelangt, so ist der reziproke Wert desselben — die betreffende Hauptkrümmung der Wellenfläche — ein Maß der Konvergenz des Strahlenbündels in dem fraglichen Punkte und in bezug auf den betreffenden Hauptschnitt. Der mit dem Brechungsindex multiplizierte reziproke Wert des Fokalabstandes wird daher die reduzierte Konvergenz genannt. Unter Anwendung dieses Begriffes können die Gleichungen A B für beide Abbildungen auf die Form

$$\varkappa^2 B = A + \varkappa D, \qquad \varkappa K B = A \quad \ldots\ldots \quad \mathrm{C}.$$

gebracht werden. A B stellen hier die reduzierten Konvergenzen des einfallenden bzw. gebrochenen Strahlenbündels dar, sind somit für die erste bzw. zweite Abbildung gleich $\frac{n}{\tau}\,\frac{n'}{\tau'}$ bzw. $\frac{n}{\varsigma}\,\frac{n'}{\varsigma'}$. $\varkappa$ ist der Vergrößerungskoeffizient im Inzidenzpunkte und hat den Wert $\frac{\cos i'}{\cos i}$ bzw. 1, während K den ersten bzw. zweiten Vergrößerungskoeffizienten in den betreffenden Fokalpunkten bedeutet, und D, die Brechkraft der Fläche im Inzidenzpunkte, für die erste bzw. zweite Abbildung den Wert

$$\frac{n'\cos i' - n\cos i}{\varrho_{,}\cos i'\cos i} \quad \text{bzw.} \quad \frac{n'\cos i' - n\cos i}{\varrho_{,,}}$$

hat.

Es läßt sich nun leicht zeigen, daß die Formeln C auch dann gelten, wenn die reduzierten Konvergenzen in beliebigen, in bezug auf die betreffende Abbildung einander konjugierten Punkten gemessen werden. Wenn der Vergrößerungskoeffizient in diesen Punkten $\varkappa_1$ ist und dieselben durch die im Inzidenzpunkte gemessenen reduzierten Konvergenzen A_0 B_0 bestimmt werden, so hat man nebst den Gleichungen C die ähnlichen

$$\varkappa^2 B_0 = A_0 + \varkappa D, \qquad \varkappa\varkappa_1 B_0 = A_0$$

und erhält durch Subtraktion

$$\varkappa^2 (B_0 - B) = A_0 - A.$$

Da nun weiter, wenn die durch AB bestimmten Strahlenbündel in denselben Punkten die reduzierten Konvergenzen $A_1\,B_1$ haben,

$$\frac{1}{B_1}=\frac{1}{B}-\frac{1}{B_0},\qquad \frac{1}{A_1}=\frac{1}{A}-\frac{1}{A_0},$$

somit auch

$$B_1=\frac{B\,B_0}{B_0-B},\qquad A_1=\frac{A\,A_0}{A_0-A}=\frac{\varkappa\,KB\cdot\varkappa\,\varkappa_1\,B_0}{\varkappa^2(B_0-B)}$$

ist, so ergibt sich unmittelbar

$$\varkappa_1\,KB_1=A_1\,.$$

Anderseits erhält man durch Elimination von A bzw. A_0:

$$\varkappa-K=\frac{D}{B},\qquad \varkappa-\varkappa_1=\frac{D}{B_0}$$

und durch Subtraktion

$$\varkappa_1-K=D\left(\frac{1}{B}-\frac{1}{B_0}\right)=\frac{D}{B_1},$$

wonach für K der Wert $\frac{A_1}{\varkappa_1\,B_1}$ eingeführt wird, und

$$\varkappa_1{}^2\,B_1=A_1+\varkappa_1\,D$$

resultiert.

Bei der Zusammensetzung der durch zwei brechende Flächen zustande kommenden Abbildung des einen der beiden abbildbaren Liniensysteme seien zunächst die bezüglichen, einem im ersten Medium belegenen Objektpunkte im zweiten und dritten entsprechenden Fokalpunkte ermittelt, und es seien $\varkappa_1\,\varkappa_2$ die Vergrößerungskoeffizienten bei der Abbildung der bezüglichen Objektlinien im zweiten Medium bzw. bei der Abbildung dieser Bildlinien im dritten, während $D_1\,D_2$ die Brechkräfte der Flächen in bezug auf die betreffende Abbildung darstellen. Sind dann $A\,B$ die im ausgewählten Objektpunkte bzw. im letzteren Fokalpunkte gemessenen reduzierten Konvergenzen eines beliebigen Strahlenbündels, so erhält man für die reduzierte Konvergenz desselben Strahlenbündels in dem im zweiten Medium belegenen konjugierten Punkte die beiden Werte

$$\frac{A}{\varkappa_1{}^2}+\frac{D_1}{\varkappa_1}=\varkappa_2{}^2\,B-\varkappa_2\,D_2\,,$$

aus welchen die allgemeine Gleichung der Schnittweiten

$$\varkappa^2\,B=A+\varkappa\,D$$

wieder erhalten wird, indem

$$\varkappa=\varkappa_1\,\varkappa_2,\qquad D=\frac{D_1}{\varkappa_2}+\varkappa_1\,D_2$$

ist. Die im zweiten Medium gemessene reduzierte Konvergenz kann wiederum durch die beiden Größen

$$\varkappa_2\,K_2\,B=\frac{A}{\varkappa_1\,K_1}$$

ausgedrückt werden, wenn $K_1\,K_2$ die den beiden Flächen entsprechenden Vergrößerungskoeffizienten in den Fokalpunkten der Strahlenbündel sind. Es resultiert

$$\varkappa\,KB=A$$

wo $K=K_1\,K_2$ ist.

Diese Prozedur kann nun beliebig oft wiederholt werden. Stellt hierbei allgemein in den konjugierten Punkten, in welchen die reduzierten Konvergenzen gemessen werden, k_n den Vergrößerungskoeffizienten bei der Abbildung durch die n ersten Flächen dar, und ist $\mathfrak{D}_n$ die Brechkraft des aus den n ersten Flächen zusammengesetzten optischen Systems so ist allgemein

$$k_n = \varkappa_1 \varkappa_2 \varkappa_3 \ldots \varkappa_n = \Pi \varkappa$$

und der oben gefundene Wert kann geschrieben werden

$$k_2 \mathfrak{D}_2 - k_1 \mathfrak{D}_1 = \frac{k_2^2 D_2}{\varkappa_2},$$

wonach für n Flächen durch Summation

$$k_n \mathfrak{D}_n = \frac{k_1^2 D_1}{\varkappa_1} + \frac{k_2^2 D_2}{\varkappa_2} + \ldots + \frac{k_n^2 D_n}{\varkappa_n} = \sum \frac{k^2 D}{\varkappa}$$

erhalten wird.

Der Gültigkeitsbereich der allgemeinen, in Umdrehungssystemen längs einem beliebigen Hauptstrahle gültigen Abbildungsgleichungen

$$\varkappa^2 B = A + \varkappa D, \qquad \varkappa K B = A$$

erstreckt sich also auf beliebige Medien, indem $\varkappa$ den Vergrößerungskoeffizienten in zwei beliebigen in bezug auf die betreffende Abbildung einander konjugierten Punkten, AB die in diesen Punkten gemessenen reduzierten Konvergenzen eines beliebigen Strahlenbündels, K den Vergrößerungskoeffizienten in den durch AB bestimmten Fokalpunkten darstellt, und für ein aus n Einzelsystemen zusammengesetztes System

$$D = \frac{1}{\varkappa} \sum \frac{k^2 D}{\varkappa}$$

ist, wobei die Summe entsprechend jedem der n Einzelsysteme je ein Glied enthält.

Durch diese Formeln erhält man auch allgemein die anguläre Vergrößerung. Hierunter versteht man das Verhältnis der Winkel, unter welchen die gegenseitigen Abstände zweier Bildlinien und der entsprechenden abbildbaren Linien in zwei konjugierten Punkten gesehen werden. Der anguläre Vergrößerungskoeffizient in den Punkten, in welchen der im Gegensatz zu demselben sogenannte laterale Vergrößerungskoeffizient $\varkappa$ ist, wird demnach, wenn $n n'$ die Brechungsindizes, $\beta \beta'$ die Linienelemente der orthogonalen Trajektorien der ineinander abgebildeten Linien sind, durch das Verhältnis der beiden Winkel $\frac{\beta' B}{n'}$ und $\frac{\beta A}{n}$ angegeben, ist somit gleich $\frac{n K B}{n' A}$, welcher Wert mit $\frac{n}{n' \varkappa}$ identisch ist. Das Produkt des angulären Vergrößerungskoeffizienten mit dem lateralen und mit dem relativen Brechungsindex ist somit stets gleich der Einheit. In Übereinstimmung mit der Einführung der reduzierten Abstände empfiehlt es sich nun, dieselben auch in diesem Ausdrucke zu benutzen, wobei der reduzierte anguläre Vergrößerungskoeffizient gleich $\frac{KB}{A}$ d. h. gleich dem reziproken Werte des lateralen Vergrößerungskoeffizienten ist.

Setzt man in den allgemeinen Abbildungsgleichungen $B = 0$ bzw. $A = 0$, so erhält man für die reduzierten Abstände des ersten bzw. zweiten Haupt-

brennpunktes $-\frac{1}{\varkappa D}$ bzw. $\frac{\varkappa}{D}$, und wenn $K = 1$ gesetzt wird, ergibt sich für die reduzierten Abstände des ersten bzw. zweiten Hauptpunktes $\frac{\varkappa - 1}{\varkappa D}$ bzw. $\frac{\varkappa - 1}{D}$, wonach durch Subtraktion letzterer Werte von den ersteren die reduzierten Abstände des ersten bzw. zweiten Hauptbrennpunktes vom ersten bzw. zweiten Hauptpunkte, $-\frac{1}{D}$ bzw. $\frac{1}{D}$, erhalten werden, und die Brechkraft somit allgemein als der reziproke Wert der mit dem betreffenden Brechungsindex dividierten zweiten Hauptbrennweite definiert ist.

Werden die allgemeinen Abbildungsgleichungen auf die Hauptpunkte bezogen, so erhalten dieselben die Form

$$B = A + D, \qquad KB = A,$$

in welcher sie besagen, daß die reduzierte Konvergenz beim Durchgang durch ein optisches System um den Betrag der Brechkraft desselben vermehrt wird, und daß der laterale Vergrößerungskoeffizient gleich dem Verhältnis der reduzierten Hauptpunktabstände der Fokalpunkte des gebrochenen und einfallenden Strahlenbündels ist, während der reduzierte anguläre Vergrößerungskoeffizient in den Hauptpunkten gleich der Einheit ist. Diese Formeln haben eben denselben allgemeinen Gültigkeitsbereich wie jene und gewähren dabei den Vorzug, das Wesen der optischen Abbildung klar hervortreten zu lassen, haben aber anderseits den Nachteil, daß ihre Anwendung auf die durch die Bedingung $D = 0$ charakterisierten sogenannten teleskopischen oder besser afokalen Systeme eine umständliche Umformung erfordert, während die allgemeinen Abbildungsgleichungen unverändert anwendbar sind.

Führt man in die auf die Hauptpunkte bezogenen Abbildungsgleichungen die Bedingung gleicher (nicht reduzierter) Konvergenz des einfallenden und gebrochenen Strahlenbündels ein, so ergibt sich

$$\frac{B}{n'} = \frac{A}{n} = \frac{D}{n' - n}, \qquad K = \frac{n}{n'}$$

und fallen die Fokalpunkte der Strahlenbündel mit den Listingschen Knotenpunkten zusammen, wobei der (nicht reduzierte) anguläre Vergrößerungskoeffizient in denselben gleich der Einheit ist. Da aber die den Knotenpunkten zugeschriebenen Eigenschaften bei endlicher Strahlneigung nur in Systemen, welche aus einer einzigen sphärischen Fläche bestehen, der Realität entsprechen, was nur allzu leicht übersehen wird, so bieten die auf dieselben bezogenen Abbildungsgleichungen um so weniger Nutzen, als der Begriff des reduzierten angulären Vergrößerungskoeffizienten den auf die Hauptpunkte bezogenen Gleichungen eben die Vorteile zuversichert, welche an den Knotenpunktsgleichungen besonders geschätzt werden.

Dagegen bieten in vielen Fällen die Brennpunktsgleichungen wirklichen Nutzen. Man erhält dieselben sowohl direkt aus den oben ermittelten Ausdrücken für die Abstände der Brennpunkte von beliebigen konjugierten Punkten, wie auch auf folgende Weise. Wird aus den allgemeinen Abbildungsgleichungen einmal B, einmal A eliminiert, so erhalten dieselben die für gewisse Probleme sehr anwendbare Form

$$D = A\left(\frac{1}{K} - \frac{1}{\varkappa}\right) = B(\varkappa - K),$$

in welcher sie auch dann anwendbar sind, wenn einer der beiden konjugierten Punkte, in welchen der Vergrößerungskoeffizient $\varkappa$ ist, in unendlicher Entfernung liegt, wobei $\varkappa = 0$ bzw. $\frac{1}{\varkappa} = 0$ zu setzen ist. Es ergeben sich auf diese Weise, wenn $L\,L'$ die im ersten bzw. zweiten Brennpunkte eines optischen Systems gemessene reduzierte Konvergenz eines Strahlenbündels bezeichnen, die beiden Gleichungen

$$KD = L, \qquad KL' = -D,$$

aus welchen

$$LL' = -D^2, \qquad \frac{L}{L'} = -K^2$$

resultiert, wo K, wie gewöhnlich den Vergrößerungskoeffizienten in den Fokalpunkten der durch die reduzierten Konvergenzen $L\,L'$ bestimmten Strahlenbündel bezeichnet.

Wenn man bei der Zusammensetzung zweier Systeme ohne den oben angegebenen Weg zu befolgen unmittelbar die Brechkraft $\mathfrak{D}$ des zusammengesetzten Systems und die Lage der Hauptpunkte desselben finden will, so erhält man auf folgende Weise die hierzu nötigen Formeln. Es sei das erste System durch die Brechkraft D_1 und durch zwei beliebige konjugierte Punkte, in welchen der Vergrößerungskoeffizient $\varkappa_1$ ist, das zweite durch die Brechkraft D_2 und durch zwei beliebige konjugierte Punkte mit dem Vergrößerungskoeffizienten $\varkappa_2$ definiert, und es stelle δ den reduzierten, d. h. mit dem betreffenden Brechungsindex dividierten, Abstand des ersten der letztgenannten Punkte vom zweiten der erstgenannten dar. Für ein beliebiges Strahlenbündel seien reduzierte Konvergenzen und Vergrößerungskoeffizienten in den beiden Systemen mit $A_1\,B_1\,K_1\,A_2\,B_2\,K_2$ bezeichnet. Laut der oben gegebenen Deduktion ist dann die Brechkraft des zusammengesetzten Systems gleich $\frac{D_1}{K_2} + K_1\,D_2$. Man erhält durch Elimination von A_1 und B_2 aus den allgemeinen Abbildungsgleichungen

$$K_1 = \varkappa_1 - \frac{D_1}{B_1}, \qquad \frac{1}{K_2} = \frac{1}{\varkappa_2} + \frac{D_2}{A_2}$$

und da

$$\frac{1}{B_1} - \frac{1}{A_2} = \delta,$$

ist:

$$\mathfrak{D} = \frac{D_1}{K_2} + K_1\,D_2 = \frac{D_1}{\varkappa_2} + \varkappa_1\,D_2 - \delta\,D_1\,D_2,$$

welcher Ausdruck die Brechkraft des zusammengesetzten Systems durch die die beiden Einzelsysteme bestimmenden Größen angibt und für $\delta = 0$ in den oben unter dieser Bedingung hergeleiteten übergeht. Sind $H\,H'$ die reduzierten Abstände des ersten bzw. zweiten Hauptpunktes des zusammengesetzten Systems vom ersten definierten Punkte des ersten Systems bzw. vom zweiten definierten Punkte des zweiten Systems, so hat man, wenn $K_1\,K_2 = 1$ gesetzt wird, $H = \frac{1}{A_1}$, $H' = \frac{1}{B_2}$. Diese Bedingung

$$\varkappa_1 - \frac{D_1}{B_1} = \frac{1}{\varkappa_2} + \frac{D_2}{A_2}$$

ergibt aber, wenn einmal A_2 durch B_1, einmal B_1 durch A_2 ersetzt wird:

$$B_1\left(\delta D_2 + \varkappa_1 - \frac{1}{\varkappa_2}\right) = D_1 + D_2 = -A_2\left(\delta D_1 + \frac{1}{\varkappa_2} - \varkappa_1\right)$$

und dann nach Einführung von $A_1 B_2$ anstatt $B_1 A_2$:

$$\frac{A_1}{\varkappa_1}\left(\delta D_2 + \varkappa_1 - \frac{1}{\varkappa_2}\right) = \mathfrak{D} = -\varkappa_2 B_2\left(\delta D_1 + \frac{1}{\varkappa_2} - \varkappa_1\right).$$

Die allgemeinen Formeln für die Zusammensetzung zweier Systeme sind somit

$$\mathfrak{D} = \frac{D_1}{\varkappa_2} + \varkappa_1 D_2 - \delta D_1 D_2,$$

$$H = \frac{1}{\varkappa_1 \mathfrak{D}}\left(\delta D_2 + \varkappa_1 - \frac{1}{\varkappa_2}\right).$$

$$H' = -\frac{\varkappa_2}{\mathfrak{D}}\left(\delta D_1 + \frac{1}{\varkappa_2} - \varkappa_1\right).$$

Werden beide Systeme auf die Hauptpunkte bezogen, so hat man $\varkappa_1 = \varkappa_2 = 1$ und findet:

$$\mathfrak{D} = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2 \qquad H = \frac{\delta D_2}{\mathfrak{D}} \qquad H' = -\frac{\delta D_1}{\mathfrak{D}}.$$

Ist wiederum das erste bzw. zweite System afokal, so hat man nur $D_1 = 0$ bzw. $D_2 = 0$ zu setzen. Wenn das andere System auf die Hauptpunkte bezogen wird, wobei $\varkappa_2 = 1$ bzw. $\varkappa_1 = 1$ ist, ergibt sich somit

$$\mathfrak{D} = \varkappa_1 D_2, \qquad H = \frac{\delta}{\varkappa_1^2} + \frac{\varkappa_1 - 1}{\varkappa_1^2 D_2}, \qquad H' = \frac{\varkappa_1 - 1}{\varkappa_1 D_2}$$

bzw.

$$\mathfrak{D} = \frac{D_1}{\varkappa_2}, \qquad H = \frac{\varkappa_2 - 1}{D_1}, \qquad H' = -\varkappa_2^2\delta + \frac{\varkappa_2(\varkappa_2 - 1)}{D_1}.$$

Sind beide Systeme afokal, so hat man nur im Ausdrucke für δ mittels der allgemeinen Gleichung der Schnittweiten $B_1 A_2$ durch $A_1 B_2$ zu ersetzen, um für das zusammengesetzte System die Gleichung

$$\frac{1}{\varkappa_1 \varkappa_2 B_2} = \frac{\varkappa_1 \varkappa_2}{A_1} - \frac{\varkappa_2 \delta}{\varkappa_1}$$

zu erhalten, während

$$K = \varkappa_1 \varkappa_2$$

überall den Vergrößerungskoeffizienten angibt. Für eine planparallele Platte und für ein Prisma, welches unter der Bedingung der minimalen Ablenkung vom Hauptstrahle passiert wird, ist für beide Abbildungen $\varkappa_1 \varkappa_2 = 1$, woraus

$$\frac{1}{B_2} = \frac{1}{A_1} - \frac{\delta}{\varkappa_1^2}$$

erhalten wird. Befindet sich nun die Platte bzw. das Prisma in Luft und stellen $i\,i'$ Einfalls- und Brechungswinkel in der ersten Fläche dar, so erhält man für das gebrochene Strahlenbündel

$$\frac{1}{B_2} = \frac{1}{A_1} - \frac{\delta \cos^2 i}{\cos^2 i'} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{B_2} = \frac{1}{A_1} - \delta,$$

wonach, wenn die Refraktionsebene als der erste Hauptschnitt bezeichnet wird, und wenn das einfallende Licht homozentrisch ist, der Abstand des ersten Fokalpunktes vom zweiten den Wert

$$\delta \cdot \frac{\cos^2 i' - \cos^2 i}{\cos^2 i'}$$

hat. Diese Brennstrecke, welche somit von der Lage des Objektpunktes unabhängig ist, gibt also den tatsächlich vorhandenen Astigmatismus an. Derselbe kann ersichtlicherweise nur dann vernachlässigt werden, wenn der Weg des Lichtes in der Platte bzw. im Prisma im Verhältnis zum Abstande des Objektpunktes verschwindend klein ist.

In der physiologischen Optik ist es von Vorteil, die Formeln für die Zusammensetzung von drei optischen Systemen fertig zu haben. Man erhält dieselben auf folgende Weise unter Benutzung der oben angegebenen allgemeinen Methode. Es seien $D_1\, D_2\, D_3$ bzw. $\mathfrak{D}$ die Brechkräfte der Teilsysteme bzw. des Vollsystems, $\delta_1\, \delta_2$ die reduzierten Abstände des ersten Hauptpunktes des folgenden Systems vom zweiten Hauptpunkte des vorhergehenden. Zunächst werden die den Hauptpunkten des zweiten Systems im ersten und letzten Medium konjugierten Punkte aufgesucht. Es ergibt sich

$$A_1 + D_1 = \frac{1}{\delta_1}, \qquad B_3 = D_3 - \frac{1}{\delta_2},$$

$$\frac{\varkappa_1}{\delta_1} = A_1, \qquad \varkappa_3 B_3 = -\frac{1}{\delta_2}$$

und somit

$$\varkappa_1 = 1 - \delta_1 D_1, \qquad \varkappa_2 = 1, \qquad \varkappa_3 = \frac{1}{1 - \delta_2 D_3},$$

wonach die allgemeine Summenformel der Brechkraft

$$\mathfrak{D} = D_1 (1 - \delta_2 D_3) + D_2 (1 - \delta_1 D_1)(1 - \delta_2 D_3) + D_3 (1 - \delta_1 D_1)$$

ergibt. Die reduzierten Abstände der Hauptpunkte des Vollsystems von den beiden im ersten und letzten Medium ermittelten, konjugierten Punkten sind, wie oben bewiesen wurde, wenn $\varkappa$ für $\varkappa_1\, \varkappa_3$ gesetzt wird,

$$\frac{\varkappa - 1}{\varkappa \mathfrak{D}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\varkappa - 1}{\mathfrak{D}},$$

woraus für die reduzierten Abstände $H H'$ der Hauptpunkte des Vollsystems vom ersten Hauptpunkte des ersten bzw. vom zweiten Hauptpunkte des letzten Systems die Werte

$$H = \frac{1}{A_1} + \frac{\varkappa - 1}{\varkappa \mathfrak{D}} = \frac{\delta_1}{1 - \delta_1 D_1} + \frac{\delta_2 D_3 - \delta_1 D_1}{\mathfrak{D}(1 - \delta_1 D_1)}$$

$$H' = \frac{1}{B_3} + \frac{\varkappa - 1}{\mathfrak{D}} = -\frac{\delta_2}{1 - \delta_2 D_3} + \frac{\delta_2 D_3 - \delta_1 D_1}{\mathfrak{D}(1 - \delta_2 D_3)}.$$

Ist das Vollsystem symmetrisch in bezug auf das mittlere Teilsystem, indem $\delta_2 = \delta_1$ und $D_3 = D_1$ ist, so erhält man

$$\mathfrak{D} = 2 D_1 (1 - \delta_1 D_1) + D_2 (1 - \delta_1 D_1)^2,$$

$$H = - H' = \frac{\delta_1}{1 - \delta_1 D_1}.$$

Was die Wahl der Vorzeichen betrifft, so wurden die für eine einzelne Fläche gültigen Abbildungsgleichungen unter der nunmehr allgemein angenommenen Bedingung entwickelt, daß die Abstände der Fokalpunkte und des Krümmungsmittelpunktes der brechenden oder spiegelnden Fläche vom Inzidenzpunkte in einer und derselben Richtung positiv gerechnet werden, und daß ein positives Vorzeichen des Vergrößerungskoeffizienten eine gleichsinnige Abbildung angibt. Da weiter bei einer Spiegelung das Vorzeichen des Brechungsindex gewechselt werden muß, und in zusammengesetzten Systemen überall eine gleichsinnige positive Richtung zu wählen ist, so wird dieselbe am besten in bezug auf die Lichtbewegung im Objektraume definiert. Wählt man hier die mit derselben gleichsinnige Richtung, so bedeutet immer, da bei jeder Spiegelung sowohl die positive Richtung im Verhältnis zur Lichtbewegung wie das Vorzeichen des Brechungsindex gewechselt wird, ein positives Vorzeichen der reduzierten Konvergenz, daß die betreffenden Strahlen konvergieren, ein positives Vorzeichen der Brechkraft, daß das System sammelnd wirkt, und ist immer der reduzierte Abstand eines Punktes von einem anderen positiv, wenn man, der Richtung der Lichtbewegung folgend, vom letzteren zum ersteren gelangt. Es ergeben sich somit folgende allgemeine Regeln. Längs dem Hauptstrahle ist überall diejenige Richtung positiv, welche mit der Lichtbewegung im Objektraume gleichsinnig ist. Die Brechungsindizes der nach einer ungeraden Anzahl von Spiegelungen vom Lichte durchlaufenen Medien sind negativ anzusetzen. Der Abstand eines Punktes von einem anderen ist positiv, wenn man, der positiven Richtung folgend, vom letzteren zum ersteren gelangt, und ein Krümmungsradius ist der Abstand des Krümmungsmittelpunktes vom Flächenpunkte. Endlich ist ein Vergrößerungskoeffizient positiv, wenn man, in der positiven Richtung längs den betreffenden Hauptstrahlen blickend, die ineinander abgebildeten Linien auf einer und derselben Seite dieser Strahlen sieht.

Die Einheit, mit welcher die reduzierte Konvergenz und die Brechkraft gemessen wird, kann beliebig gewählt werden. Da aber in der Ophthalmologie die Dioptrie sich als Einheit der Brechkraft von Linsen bewährt hat, und die Brechkraft einer in Luft befindlichen Linse von 1 m Brennweite angibt, so empfiehlt es sich diese Einheit allgemein zu gebrauchen, wobei dieselbe als die Einheit des reziproken Wertes einer durch Division mit dem betreffenden Brechungsindex reduzierten, in Meter gemessenen Haupt- oder Konjugatbrennweite definiert werden muß.[1]

Die einfache und übersichtliche Darstellung sämtlicher für die Umdrehungssysteme gültiger Abbildungsgesetze in einer Form, welche längs jedem beliebigen Hauptstrahl anwendbar ist, und durch welche das Koinzidieren desselben mit der Umdrehungsachse als spezieller Fall dargestellt wird, ist nur durch die Begriffe der reduzierten Konvergenz und der Brechkraft ermöglicht worden. Man kann sich aber trotz der verschiedenen Form sehr leicht davon überzeugen,

---

[1] A. Gullstrand, Über die Bedeutung der Dioptrie. Arch. f. Ophth. Bd. XLIX, 1. S. 46. 1899. Zu bemerken ist, daß der in dieser Schrift für afokale Systeme angewendete Koeffizient k den reduzierten angulären Vergrößerungskoeffizienten darstellt.

daß die allgemeinen Abbildungsgleichungen mit den im HELMHOLTZschen Texte S. 57—58 angeführten Gleichungen 7) bzw. 7d) identisch sind, während die Gleichungen 7b) und 7c) in der oben angewendeten Form leicht erkenntlich sind. Dagegen sucht man in obenstehender Darstellung vergebens nach einer besonderen Würdigung der auf die Knotenpunkte bezogenen Gleichungen. Dies steht, wie schon oben betont wurde, damit in Zusammenhang, daß die wesentliche Eigenschaft der Knotenpunkte nur für eine einzige sphärische Fläche bei endlicher Strahlneigung reell ist. Solange man die Abbildung einer endlichen Objektfläche als approximativ ähnlich derjenigen des zentralen Elementes derselben ansah, so konnten im Einklange mit dieser Anschauung die geometrischen Konstruktionen die Relation der konjugierten Punkte zueinander und zu den Kardinalpunkten versinnlichen. Sowie aber an dem tatsächlichen streng festgehalten wird, ist eine solche Versinnlichung nicht mehr am Platze, da die bei der Konstruktion verwendeten Gesetze nur für die Fiktion unendlich kleiner Strahlneigungen gültig sind, die Konstruktionen deshalb oft falsche Vorstellungen erwecken. Für die Darstellung der tatsächlichen Vorgänge bieten aber weder die Knotenpunkte noch die Haupt- oder Brennebenen, welche ebenfalls nur für die Fiktion unendlich kleiner Strahlneigung ihre charakteristischen Eigenschaften besitzen, irgend einen Vorteil, weshalb auch diese Begriffe lieber als unnützer Ballast beiseite gelassen werden. Dasselbe gilt von den genannten geometrischen Konstruktionen, und die hier oben zur Ermittelung der Abbildungsgleichungen für eine einzige Fläche angewendeten sollen auch nur dem Zweck dienen, dem Leser die sonst unumgängliche Differentialrechnung zu ersparen.

In der oben gegebenen Darstellung kommt nirgends eine Fiktion vor, sondern wird überall mit exakten geometrischen Größen und — betreffend die Vergrößerung — mit ausdrücklich als Limeswerten bezeichneten Koeffizienten gearbeitet. Eben hierdurch unterscheidet sich auch der Begriff der reduzierten Konvergenz von dem nur für die Fiktion unendlich kleiner Strahlneigung gültigen Begriffe der optischen Divergenz der Strahlen und der optischen Neigung eines Strahles.[1]

Den umgekehrten Weg haben bei der Darstellung der Gesetze der optischen Abbildung ABBE und seine Schüler[2] befolgt, indem die Theorie der kollinearen Abbildung ohne Rücksicht auf die Verhältnisse bei der Brechung und Spiegelung des Lichtes aus einfachen geometrischen Voraussetzungen hergeleitet wurde. Da die kollineare Abbildung jedoch nur unter der Fiktion unendlich dünner Strahlenbündel und nur für ein unendlich kleines die Achse eines Umdrehungssystems schneidendes Objektflächenelement gültig ist, längs anderen Hauptstrahlen aber die Einführung neuer Fiktionen erfordert, so kann dieselbe, nachdem die allgemeinen Abbildungsgesetze bekannt geworden sind, nur als ein unrealisierbares Ideal hingestellt werden. Daß in vielen modernen optischen Instrumenten die Realität diesem Ideale sehr nahe kommt, beruht nur auf einer Anhäufung mathematischer Singularitäten bei der Konstruktion. Man muß sich wohl vor der Vorstellung in acht nehmen, es wäre eine exakte Nachahmung des Ideales möglich, und am allerwenigsten darf man glauben, daß dasselbe die Abbildung im Auge repräsentiere.

[1] H. v. HELMHOLTZ, Handbuch der physiologischen Optik, 2. Auflage, Hamburg und Leipzig 1896. S. 66 bzw. 71.

[2] S. CZAPSKI, Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente nach ABBE. 2. Auflage, Leipzig 1904.

Bei der Anwendung der Abbildungsgesetze muß man stets vor Augen haben, daß dieselben nur die Fokalpunkte und die Vergrößerungskoeffizienten längs dem betreffenden Hauptstrahle ergeben. Bei der Untersuchung des auf einer Schirmfläche entstandenen Bildes müssen deshalb die von einer willkürlichen Wahl des Hauptstrahles beeinflußten Erscheinungen besonders berücksichtigt werden. Um den Charakter des Umdrehungssystemes zu bewahren, muß dabei die Schirmfläche entweder, wie gewöhnlich der Fall ist, eine achsensenkrechte Ebene oder aber eine Umdrehungsfläche sein, deren Achse mit der Achse des Instrumentes zusammenfällt, und es können den verschiedenen Objektpunkten entsprechend nur diejenigen Strahlen als Hauptstrahlen gewählt werden, welche die Achse schneiden. Wenn nun die Schirmfläche den dem axialen Objektpunkte entsprechenden Bildpunkt enthält, so berührt sie in demselben die beiden Bildflächen. Einem in endlichem aber kleinem Abstande von der Achse belegenen Objektpunkte entspricht ein durch das Blendenzentrum gehender Hauptstrahl, längs welchem das Strahlenbündel astigmatisch ist. Dasselbe Strahlenbündel ist aber, wenn die Blende eine endliche Größe hat, und wenn eine gewisse Proportion des Abstandes des Objektpunktes von der Achse zu der Blendengröße nicht überschritten wird, längs einem anderen, durch die Blende gehenden Strahle anastigmatisch. Die auf diese Weise entstehenden, den unweit der Achse belegenen Objektpunkten entsprechenden, anastigmatischen Bildpunkte liegen auf einer Fläche, welche im Schnittpunkte der Schirmfläche mit der Achse dieselbe berührt. Da es sich nun praktisch niemals um eine Abbildung mathematischer Punkte handelt, so folgt hieraus, daß in einem endlichen, den axialen Bildpunkt umgebenden Bezirke, dessen Ausdehnung von der Blendengröße abhängt, das auf der Schirmfläche entstandene Bild praktisch nicht von einem durch wirkliche Abbildung von Punkten entstandenen unterschieden werden kann. Dieser Bezirk ist offenbar um so größer, je weniger die Krümmungen der Bildflächen voneinander und von der Krümmung der Schirmfläche abweichen. Bei der Untersuchung des Strahlenbündels, welches von einem in der nächsten Umgebung des diesem Bezirke entsprechenden Teiles der Objektfläche belegenen Punkte ausgegangen ist, findet man, daß dieses Strahlenbündel nur längs einem exzentrisch durch die Blende gehenden, die Achse schneidenden Strahle einen Fokalpunkt auf der Schirmfläche haben kann, wonach auf der entsprechenden Zone der Schirmfläche nur das eine System der auf der Objektfläche verlaufenden abbildbaren Linien abgebildet wird. Stellt die Schirmfläche eine Ebene dar, so ist es im allgemeinen das System der Meridianlinien, welches durch positive Systeme in dieser Zone abgebildet wird, indem die Bildflächen in den gewöhnlichen aus sphärischen Flächen bestehenden Systemen im allgemeinen die konkaven Seiten gegen das System wenden, und die erste Bildfläche demselben näher liegt als die zweite. Auf den außerhalb dieser Zone belegenen Teil der Schirmfläche fällt wiederum längs keinem Strahle ein Fokalpunkt, wonach das Bild hier nur durch optische Projektion zustande kommt.

In Übereinstimmung mit dem eben geschilderten Vorgange kann man sich z. B. unter Anwendung einer sogenannten einfachen photographischen Landschaftslinse sehr leicht davon überzeugen, daß auf der für die schärfste Abbildung des axialen Objektpunktes eingestellten Visierscheibe, im zentralen Bezirke beliebige Objektlinien und -punkte gleich scharf abgebildet werden, während in einer umgebenden Zone Linien, welche in Meridianebenen liegen,

schärfer als andere abgebildet werden, und in dem außerhalb dieser Zone belegenen Gebiete die Schärfe der Abbildung überhaupt nur auf der Stufe der mit der Lochkamera erhältlichen steht.

Untersucht man auf diese Weise das Bild einer auf der Achse zentrierten und auf derselben senkrecht stehenden, aus Meridianlinien und Parallelkreisen bestehenden Figur, so findet man, daß bei kleiner Blende, wenn dieselbe längs der Achse verschoben wird, die Lage der Parallelkreise auf dem Bilde sich ändert, so daß allgemein, wenn auf dem Objekte die gegenseitigen Abstände derselben konstant sind, dies nicht auf dem Bilde der Fall ist. Es beweist dieser Versuch, daß der Vergrößerungskoeffizient auf der Achse, welcher ja von der Verschiebung der Blende unabhängig ist, allgemein nicht die Vergrößerung des Bildes, sondern nur den Limeswert angibt, welchem sich dieselbe immer mehr nähert, wenn die Größe des Objektes stetig abnimmt, sowie daß das Bild des aus den Parallelkreisen bestehenden Liniensystems nicht objektähnlich ist, während dies mit dem Bilde der Meridianlinien wegen der charakteristischen Eigenschaften der Umdrehungssysteme auch dann der Fall ist, wenn bei verschobener Schirmfläche das ganze Bild nur durch optische Projektion zustande kommt. Der Mangel an Objektähnlichkeit bei der ersten Abbildung nimmt aber mit abnehmender Objektgröße immer mehr ab, um in dem Augenblicke, wo das Objekt auf den axialen Punkt reduziert ist, vollständig zu verschwinden. Je nach der erforderlichen Genauigkeit der Untersuchung hat man wegen diesem Mangel an Objektähnlichkeit immer eine größere oder geringere Anzahl von Hauptstrahlen mit trigonometrischer Rechnung zu verfolgen, um die Schnittpunkte derselben mit der Schirmfläche zu ermitteln. Die Abbildungsgleichungen ergeben dann die auf denselben belegenen Fokalpunkte, welche die Schnittpunkte mit den Bildflächen darstellen. Den zweiten Vergrößerungskoeffizienten erhält man hierbei allgemein direkt aus der Lage des zweiten Fokalpunktes, indem zufolge der Objektähnlichkeit bei der Abbildung der Meridianlinien derselbe durch das Verhältnis der Achsenabstände des Fokalpunktes und des Objektpunktes ausgedrückt wird; den ersten muß man mit den Abbildungsgleichungen ermitteln. Weil aber die Fokalpunkte im allgemeinen Falle nicht auf der Schirmfläche liegen, so hat man bei der Untersuchung des Bildes mit den linearen Projektionskoeffizienten zu rechnen. Da in Umdrehungssystemen nicht nur die abbildbaren Linien und Bildlinien, sondern auch deren orthogonale Trajektorien mit den Meridianlinien und den Parallelkreisen zusammenfallen, letztere somit auch ineinander projiziert werden können, so wird der lineare Projektionskoeffizient, mit welchem man bei der Projektion von Meridianlinien bzw. Parallelkreisen zu rechnen hat, als der erste bzw. zweite bezeichnet. Während nun der zweite lineare Projektionskoeffizient in Analogie mit dem zweiten Vergrößerungskoeffizienten durch das Verhältnis der Achsenabstände der Schnittpunkte des betreffenden Hauptstrahles mit der Schirmfläche und der Objektfläche ausgedrückt wird, erhält man auf folgende Weise den ersten. Wenn der reduzierte Abstand der Schirmfläche von dem ersten Fokalpunkte, längs dem betreffenden Hauptstrahl gemessen, mit δ' bezeichnet wird, und $\mathfrak{B}$ die in diesem Punkte gemessene reduzierte Konvergenz des Hauptstrahlenbündels in der Meridianebene darstellt, so verhält sich der Abstand eines nächstliegenden Hauptstrahles vom Fokalpunkte zu dem Abstand desselben Hauptstrahles von dem Schnittpunkte des ersteren mit der Schirmfläche, wie die Abstände der beiden Punkte von dem Schnittpunkte der beiden Haupt-

strahlen, d. h. wie $\frac{1}{\mathfrak{B}} : \left(\frac{1}{\mathfrak{B}} - \delta'\right)$, und ist somit $1 - \delta' \mathfrak{B}$ der lineare Projektionskoeffizient in den beiden Punkten. Der erste lineare Projektionskoeffizient C_1 für den entsprechenden Objektpunkt ist demnach

$$C_1 = K_1 (1 - \delta' \mathfrak{B})$$

und es gilt für den zweiten die analoge Formel. Die Anwendung dieser Formel setzt somit voraus, daß das Hauptstrahlenbündel bis in den Bildraum verfolgt worden ist, wozu die gewöhnlichen Abbildungsgleichungen angewendet werden. *Die aktuelle lineare Vergrößerung bei der Projektion ist von der Neigung der Objekt- und Schirmfläche gegen den Hauptstrahl abhängig, indem der Limeswert derselben, wenn $w w'$ die Winkel darstellen, welche die Normalen der betreffenden Flächen mit dem Hauptstrahl bilden, gleich* $C_1 \frac{\cos w}{\cos w'}$ ist. Für die Projektion von Parallelkreisen ist dieser Limeswert gleich dem zweiten linearen Projektionskoeffizienten.

Die hier dargestellten Abbildungsgesetze erster Ordnung gelten allgemein auch in einfach asymmetrischen Systemen, wobei aber beide Vergrößerungs- und linearen Projektionskoeffizienten, wie in Umdrehungssystemen mit den ersten der Fall ist, berechnet werden müssen. Die Symmetrieebene, welche in solchen Systemen keine Meridianebene darstellt wird die Tangentialebene, die auf derselben senkrecht stehende die Sagittalebene genannt. Die Formeln für die Abbildung längs der Achse in symmetrischen Systemen ergeben sich aus den in einfach asymmetrischen Systemen gültigen, indem der Cosinus des Einfalls- und Brechungswinkels überall gleich 1 gesetzt wird. Man hat hierbei die den beiden Symmetrieebenen entsprechenden Abbildungen voneinander zu trennen, indem die eine dieser Ebenen willkürlich als die erste bezeichnet wird. In Umdrehungssystemen sind die auf dieselbe Weise erhaltenen Gleichungen der Abbildung auf der Achse von der Orientierung der Symmetrieebene unabhängig.

Die Abbildungsgesetze höherer Ordnung. Die für einfach asymmetrische Systeme vollständig entwickelten Abbildungsgesetze zweiter Ordnung ergeben u. a. für Umdrehungssysteme Formeln, welche längs einem beliebigen Hauptstrahle die Neigung der Bildflächen und den Asymmetrienwert des ersten Vergrößerungskoeffizienten bekannt machen. Letzterer Wert gibt an, um welchen Betrag dieser Koeffizient beim Übergang auf einen nächstliegenden Hauptstrahl verändert wird. Durch andere Formeln erhält man die Asymmetrienwerte der Strahlenbündel, welche die Güte der Strahlenvereinigung angeben. Das allgemeine, doppelt asymmetrische Strahlenbündel wird von vier solchen Werten bestimmt, während das in Umdrehungssystemen vorkommende einfach asymmetrische Strahlenbündel durch zwei Asymmetrienwerte charakterisiert ist.

Wenn man in der Symmetrieebene eines solchen Strahlenbündels von Strahl zu Strahl übergeht, so liegen sämtliche ersten Fokalpunkte auf der Schnittlinie der ersten kaustischen Fläche, welche überall von den Strahlen be-

rührt wird. In der Fig. 117, wo $F_{,} F_{,,}$ die auf dem Strahle $O F_{,} F_{,,}$ belegenen Fokalpunkte darstellen, ist diese Linie, welche allgemein die τ-Linie genannt sein mag, mit $\tau F_{,} \tau$ bezeichnet. Die in der Zeichnungsebene verlaufenden Strahlen werden also als Tangenten dieser Linie konstruiert, wonach die durch O gezogene, auf sämtlichen Strahlen senkrecht stehende krumme Linie die Schnittlinie der diesem Punkte entsprechenden Wellenfläche darstellt. Wird auf jedem Strahle der zweite Fokalpunkt markiert, so bilden diese sämtlichen Punkte eine krumme Linie, die ς-Linie, welche in der Figur mit $\varsigma F_{,,} \varsigma$ bezeichnet ist, und welche bei endlicher Brennstrecke immer einen endlichen Winkel mit dem Strahle bildet. Es ist nun der Krümmungsradius $A F_{,}$ der τ-Linie der **direkte Asymmetrienwert** des Strahlenbündels längs dem Strahle $O F_{,} F_{,,}$ und wird mit R bezeichnet. Zieht man wiederum in $F_{,,}$ die Normale der ς-Linie, welche in B die erste Fokalebene schneidet, so ist der Abstand $B F_{,}$ dieses Schnitt-

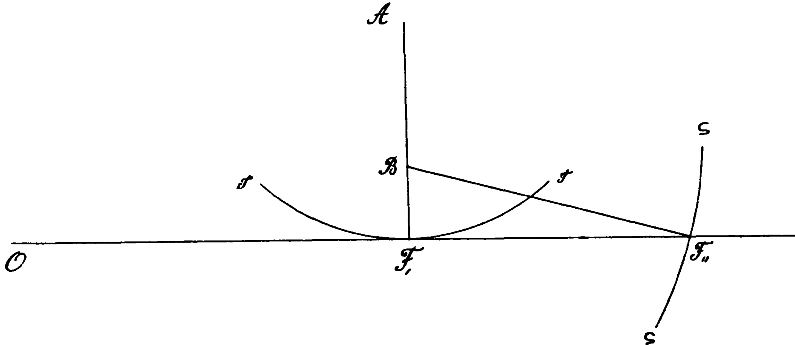


Fig. 117.

punktes vom ersten Fokalpunkt der **transversale Asymmetrienwert** und wird mit S bezeichnet. Die Vorzeichen der Asymmetrienwerte werden nach diesen Definitionen von der Wahl der positiven Richtung bestimmt. Dieselben haben somit in dem in der Figur versinnlichten Falle beide einen positiven Wert, wenn die Richtung nach oben als die positive definiert wird. In Umdrehungssystemen empfiehlt es sich, den Abstand eines Objektpunktes von der Achse immer als positiv zu rechnen und im ganzen System die mit dieser Richtung gleichsinnige Richtung einer den Hauptstrahl senkrecht schneidenden Linie als positiv zu bezeichnen. Das Vorzeichen der Brennstrecke E und des Winkels ϑ, den die ς-Linie mit der zweiten Fokalebene bildet, wird durch die Gleichungen

$$E = \varsigma - \tau, \qquad S = -E \operatorname{tg} \vartheta$$

bestimmt.

Wenn die Asymmetrienwerte dasselbe Vorzeichen haben, so ist die erste kaustische Fläche im Fokalpunkte sattelförmig gekrümmt, indem der Krümmungsmittelpunkt ihrer Schnittlinie mit der ersten Fokalebene allgemein im Schnittpunkte der Linie $A F_{,}$ mit der in $F_{,,}$ gezogenen Tangente der ς-Linie liegt. Da die Krümmung dieser Schnittlinie somit allgemein gleich $-\frac{S}{E^2}$ ist, so wird dieselbe bei zunehmenden Asymmetrienwerten immer schärfer, während der Krümmungsradius der τ-Linie immer größer wird, so daß die Sattelform mehr in eine Rinnenform übergeht.

Wird der Winkel u, den ein nächstliegender Strahl mit dem Strahle $O F_{,} F_{,,}$ bildet, dann positiv gerechnet, wenn man vom Punkte O, der positiven Richtung folgend, auf denselben gelangt, so bestehen die Identitäten

$$R = -\frac{d\tau}{du}, \qquad S = -\frac{d\varsigma}{du}$$

und es stellen somit die Asymmetrienwerte die Limeswerte der Veränderung dar, welche die von der Wellenfläche gemessenen Schnittweiten beim Übergang auf einen nächstliegenden Strahl erfahren.

Durch die Größe der Asymmetrienwerte wird die Güte der Strahlenvereinigung in erster Annäherung bestimmt. In Fällen, wo eine genauere Kenntnis derselben nötig ist, kann man diese Werte längs mehreren Strahlen berechnen, indem jedem Strahle entsprechend ein Punkt auf der τ- bzw. ς-Linie und im ersteren die beiden Krümmungen der ersten kaustischen Fläche, im letzteren die Neigung der ς-Linie gefunden werden kann. Letztere Linie stellt überall eine Kante dar, was unmittelbar daraus folgt, daß die Meridionalebene eine Symmetrieebene ist. Die Schnittlinie der zweiten kaustischen Fläche mit dem zweiten Hauptschnitt hat somit im zweiten Fokalpunkte eine Spitze, in welcher ihre beiden Zweige einander und den Strahl $O F_{,} F_{,,}$ berühren.

Will man den Strahlengang in Form von Abweichungen oder Aberrationen der einzelnen Strahlen veranschaulichen, so stellt im astigmatischen Strahlenbündel der Abstand des Schnittpunktes eines Strahles mit der dem Hauptstrahle zugehörigen ersten Fokalebene von der entsprechenden ersten Fokallinie die erste laterale Abweichung dar, während die zweite laterale Abweichung analog in bezug auf die zweite Fokallinie definiert wird. Es ist nun die erste bzw. zweite laterale Abweichung gleich

$$-\frac{u^2}{2} R - \frac{v^2}{2} S \qquad \text{bzw.} \qquad - u v S,$$

wo v die Neigung des Strahles gegen die Meridionalebene bedeutet. Diese Formeln sind aber nur für unendlich kleine Neigungen approximativ gültig und ergeben nur die von der zweiten Potenz der Neigungswinkel abhängigen Abweichungen. Ich führe sie darum auch nicht deshalb an, damit sie angewendet werden sollen, sondern nur um das Verhältnis der, exakte Größen darstellenden, Asymmetrienwerte zu dem geläufigen Begriffe der Abweichungen darzustellen.

Wenn s die Bogenlänge der Schnittlinie der Wellenfläche mit der Meridionalebene darstellt, und die Bezeichnungen

$$D_{,} = \frac{1}{\tau}, \qquad D_{,,} = \frac{1}{\varsigma}, \qquad \frac{dD_{,}}{ds} = U, \qquad \frac{dD_{,,}}{ds} = W$$

eingeführt werden, so ist allgemein

$$U = \frac{R}{\tau^3}, \qquad W = \frac{S}{\tau \varsigma^2}.$$

Die Werte UW, welche als die direkte bzw. transversale Krümmungsasymmetrie bezeichnet werden, und welche demnach den Limeswert der Veränderung angeben, den die Hauptkrümmungen der Fläche beim Übergang auf einen nächstliegenden Punkt erfahren, sollen nun nicht für die Wellenflächen, sondern für die brechenden bzw. spiegelnden Flächen des Systems Anwendung

finden. Wenn in der Fig. 117 $OF_{,}F_{,,}$ die Normale einer brechenden Fläche im Umdrehungssystem darstellen würde, so müßte die ς-Linie gerade sein und mit der Achse zusammenfallen, da in Umdrehungsflächen sämtliche zweiten Krümmungsmittelpunkte auf der Umdrehungsachse liegen. Man erhält somit in Umdrehungsflächen und im Hauptstrahlenbündel eines Umdrehungssystems, dessen Wellenfläche eine Umdrehungsfläche darstellt, überall W bzw. S aus den Formeln $W = -\frac{(\varrho_{,,} - \varrho_{,})\operatorname{tg}\vartheta}{\varrho_{,}\varrho_{,,}^2}$ bzw. $S = -(q-p)\operatorname{tg}\vartheta$, wo ϑ den Neigungswinkel der Normale bzw. des Hauptstrahles gegen die achsensenkrechte Ebene darstellt.

Ist das Strahlenbündel längs einem Strahle anastigmatisch, so berühren die beiden kaustischen Flächen einander im Fokalpunkte. Der Krümmungsradius der τ-Linie ist derselbe wie im anastigmatischen Strahlenbündel, die Krümmung der ς-Linie erhält man aus dem transversalen Asymmetrienwert durch den Ausdruck

$$-\frac{R-2S}{S^2}.$$

In dem in der Fig. 118 versinnlichten Falle hat somit $R-2S$ dasselbe Vorzeichen wie R. Haben die beiden Asymmetrienwerte dasselbe Vorzeichen, so liegen die beiden Fokalpunkte eines nächstliegenden Strahles auf einer und derselben Seite der in F errichteten Fokalebene und haben die beiden kaustischen Flächen eine Schnittlinie mit dieser Fokalebene, welche im Fokalpunkte eine beiden Flächen gemeinsame Spitze hat. Die Tangenten der beiden in der Spitze zusammenstoßenden Zweige der Schnittlinien bilden miteinander den Brennflächenwinkel, dessen trigonometrische Tangente

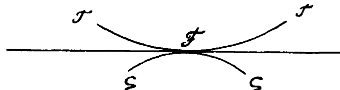


Fig. 118.

$$\frac{2\sqrt{RS}}{R-S}$$

ist. Da in den gewöhnlich vorkommenden Fällen der direkte Asymmetrienwert größer ist als der transversale, so ist dieser Winkel, dessen Bissektrize in der Symmetrieebene liegt, ein spitzer, wodurch am Querschnitte des Strahlenbündels eine charakteristische pfeilspitzenähnliche Figur entsteht.

Wird die Rechnung durch nochmalige Differentiationen um eine Stufe weiter geführt, so erhält man die Abbildungsgesetze dritter Ordnung, aus welchen u. a. Formeln hervorgehen, mit denen man im Schnittpunkte der Achse eines Umdrehungssystems mit den Bildflächen die Krümmungen dieser und den Distorsionswert des ersten Vergrößerungskoeffizienten, sowie den Variationskoeffizienten der Asymmetrienwerte erhält. Letzterer ergibt den Limeswert des Verhältnisses der Asymmetrienwerte längs einem naheliegenden Hauptstrahle zu dem Achsenabstande des Objektpunktes, wenn dieser der Achse immer mehr genähert wird, wobei der direkte Asymmetrienwert stets den dreifachen Limeswert des transversalen hat. Der Distorsionswert stellt wiederum die von der zweiten Potenz des Neigungswinkels abhängige Veränderung des ersten Vergrößerungskoeffizienten beim Übergang auf einen nächstliegenden Hauptstrahl dar. Außerdem erhält man den Aberrationswert längs der Achse.

Die Wellenfläche, welche dem axialen Objektpunkte entspricht, ist offenbar eine Umdrehungsfläche, was auch mit der ersten kaustischen Fläche der Fall sein muß, während die zweite von einem Teile der Umdrehungsachse dargestellt wird. Die Schnittlinie der ersten kaustischen Fläche mit einer Meridianebene muß wiederum, da die Achse eine Symmetrielinie darstellt im axialen Fokalpunkte eine Spitze haben, in welcher sie von der Achse berührt wird, und in welcher der Krümmungsradius gleich Null sein muß, da in diesem Punkte die Asymmetrienwerte verschwinden. Wenn in der Fig. 119 OF die Umdrehungsachse darstellt, mit welcher die ς-Linie zusammenfällt, und die Linie AFB die den verschiedenen Punkten der τ-Linie entsprechenden Krümmungsmittelpunkte dieser Linie enthält, so ist der Aberrationswert A gleich dem Krümmungsradius der Linie AFB, der sogenannten Evolute der τ-Linie, im Punkte F, und die der dritten Potenz des Neigungswinkels entsprechende laterale Abweichung eines Strahles ist $-\frac{u^3 A}{6}$. Zufolge der allgemeinen Definition der Vorzeichen eines Krümmungsradius ist der Aberrationswert positiv, wenn die Spitze der τ-Linie nach der positiven Richtung schaut, was auch mit dem geläufigen Begriffe einer positiven „sphärischen Aberration" übereinstimmt. Bei sogenannter „korrigierter sphärischer Aberration" hat die τ-Linie drei oder in besonderen Fällen auch mehr Spitzen, kann aber praktisch nicht auf einen Punkt reduziert werden, obwohl dies mathematisch nicht unmöglich wäre. Die Fig. 120 versinnlicht den Verlauf derselben in einem solchen Falle. Man sieht, daß der Aberrationswert im axialen Fokalpunkte positiv ist. Geht man auf nächstliegende Strahlen über, so findet man, wie aus der Krümmung der τ-Linie hervorgeht, einen positiven direkten Asymmetrienwert, und der transversale Asymmetrienwert hat auch dasselbe Vorzeichen, da die erste kaustische Fläche eine Umdrehungsfläche darstellt und somit die Schnittlinie derselben mit der achsensenkrechten Ebene eine negative Krümmung hat. Längs den Strahlen, welche die τ-Linie in den beiden symmetrisch belegenen Spitzen berühren, ist der direkte Asymmetrienwert gleich Null. Bei zunehmender Neigung der Strahlen wird dann dieser Wert negativ, während der transversale Asymmetrienwert zunächst positiv bleibt, um erst längs demjenigen Strahle gleich Null zu werden, welcher die τ-Linie in dem Schnittpunkte der beiden Zweige miteinander und mit der Achse berührt, wonach bei zunehmender Strahlneigung beide Werte negativ bleiben. Was die laterale Abweichung der Strahlen betrifft, so bleibt dieselbe negativ, solange der Strahl nicht die Neigung der durch den axialen Fokalpunkt gehenden Tangente der τ-Linie erreicht hat, um dann bei größerer Neigung positiv zu werden. Wenn man somit unter Aberration die Abweichung der Strahlen versteht, so kann nur von einer für eine bestimmte Strahlneigung „korrigierten sphärischen Aberration" die Rede sein. Da nun die Strahlen mit

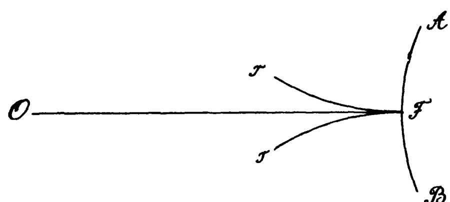
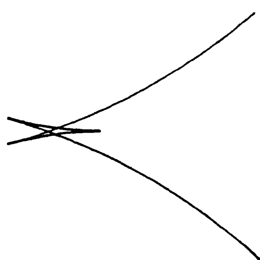


Fig. 119.


Fig. 120.

geringerer Strahlneigung sich auf dieselbe Weise verhalten wie bei „positiver sphärischer Aberration“, so repräsentiert die Fig. 120 in der Sprache der konstruktiven Optik den Fall einer für die durch die letzterwähnte Strahlneigung bestimmte Öffnung „korrigierten sphärischen Aberration mit positiven Zonen“.

Für die in der physiologischen Optik erforderliche Exaktheit sind diese Begriffe nicht ausreichend. Zieht man die Strahlen, welche in den beiden vom Fokalpunkte wegschauenden Spitzen der τ-Linie diese berühren, so erzeugen dieselben bei einer Umdrehung um die Achse eine konische Strahlenfläche, welcher auch im Blendenraume eine ebensolche entspricht. Die Schnittlinie derselben mit der Blendenebene stellt dann, je nachdem die Wellenfläche des gebrochenen Strahlenbündels oder dieses selbst ins Auge gefaßt wird, eine Linie $U = 0$ bzw. $R = 0$ dar, indem längs jedem dieselbe schneidenden Strahle der direkte Asymmetrienwert im Bildraum gleich Null ist. Der Durchmesser dieser Linie läßt sich, ebenso wie der Durchmesser und die Lage der bei der Umdrehung durch die beiden Spitzen erzeugten Kante der kaustischen Fläche, sowohl in einem bekannten Systeme leicht berechnen, wie in einem beliebigen System, dessen Zusammensetzung unbekannt ist, experimentell ermitteln. Man hat nämlich hierzu nur nötig die Schnittlinien der kaustischen Fläche auf einer achsensenkrechten Schirmebene zu beobachten, während diese verschoben wird, bis keine solche Schnittlinien mehr sichtbar sind. Wenn dann auf dem letzten Querschnitte der kaustischen Fläche die Schnittlinie nicht mit der Grenzlinie des Strahlenbündelquerschnittes zusammenfällt, so stellt sie die erwähnte Kante dar, und wenn die Blende eingeengt wird, bis die Grenzlinie mit der Kante zusammenfällt, so ist der erhaltene Blendendurchmesser der Durchmesser der Linie $R = 0$. Die Güte der Strahlenvereinigung ist aber innerhalb dieser Linie vom Abstande der Kante vom Fokalpunkte abhängig und variiert umgekehrt wie dieser. Für die außerhalb derselben die Blendenebene schneidenden Strahlen ist wiederum die auf analoge Weise konstruierte Linie $W = 0$ bzw. $S = 0$ ausschlaggebend. Längs den dieselbe schneidenden Strahlen, welche im Bildraume die Achse im Schnittpunkte derselben mit den beiden Zweigen der τ-Linie trifft, besteht eine anastigmatische Strahlenbrechung, wonach in diesem Punkte eine vollständige Strahlenvereinigung erster Ordnung längs einer unendlich großen Anzahl von Strahlen stattfindet. Endlich hat man in der lateralen Abweichung des Randstrahles ein Maß der von mir so genannten peripheren Totalaberration. Die Notwendigkeit, diese Begriffe auseinander zu halten, geht unmittelbar daraus hervor, daß bei dem in der Fig. 120 versinnlichten typischen Falle der „korrigierten sphärischen Aberration“ der Aberrationswert längs der Achse positiv, längs den der Linie $R = 0$ entsprechenden Strahlen aber negativ ist, während die periphere Totalaberration je nach der Blendengröße einen positiven oder negativen Wert hat. Ich nenne allgemein die periphere Totalaberration positiv, wenn die Randstrahlen sich so verhalten wie bei der gewöhnlichen positiven Aberration, d. h. wenn die laterale Abweichung negativ ist.

Wenn in einem astigmatischen Strahlenbündel zwei Symmetrieebenen vorhanden sind, so stellt dasselbe längs dem mit der Schnittlinie dieser Ebenen zusammenfallenden Strahle ein symmetrisches astigmatisches Strahlenbündel dar und wird von vier Aberrationswerten A_1 G_1 G_2 A_2 bestimmt, von welchen A_1 bzw. G_2 die direkte bzw. transversale Aberration im ersten Hauptschnitte messen, während A_2 G_1 die entsprechende Bedeutung für den

zweiten haben. Werden die Schnittweiten mit $s_1\, s_2$, die Winkel, welche die Projektionen eines Strahles auf den beiden Hauptschnitten mit der Symmetrielinie bilden, mit $w_1\, w_2$ bezeichnet, so ist

$$A_1 = -\frac{d^2 s_1}{d\, w_1^{\,2}},\quad G_1 = -\frac{d^2 s_1}{d\, w_2^{\,2}},\quad G_2 = -\frac{d^2 s_2}{d\, w_1^2},\quad A_2 = -\frac{d^2 s_2}{d\, w_2^{\,2}}$$

und es besteht die allgemeingültige Beziehung

$$G_1 - G_2 = s_2 - s_1 .$$

Beide kaustischen Flächen haben Kanten, welche den gleichnamigen Hauptschnitt senkrecht schneiden. Für die Schnittlinien haben die direkten Aberrationswerte dieselbe geometrische Bedeutung wie im Umdrehungssystem. Die Krümmungen der Kanten der ersten bzw. zweiten kaustischen Fläche sind

$$-\frac{G_2}{(s_2 - s_1)^2} \quad \text{bzw.} \quad -\frac{G_1}{(s_2 - s_1)^2},$$

aus welchen Werten hervorgeht, daß beide nicht auf einmal gerade sein können. Obwohl nun ein Strahlenbündel, in welchem die beiden kaustischen Flächen zu wirklichen Brennlinien zusammenschrumpfen, mathematisch möglich ist, so stellt also ein nach dem Typus des STURMschen Conoides gebautes Strahlenbündel eine mathematische Unmöglichkeit dar. Ist der Grad des Astigmatismus hinreichend niedrig im Verhältnis zur Größe der Blende und der Aberrationswerte, so gibt es zwei Strahlen, längs welchen der Astigmatismus behoben ist. Die Fig. 121 zeigt das Verhalten der τ- und ς-Linie in dem diese Strahlen enthaltenden Hauptschnitt. In dem anderen Hauptschnitt hat die τ-Linie eine Spitze in $F_{''}$ und die ς-Linie geht mit endlicher Krümmung durch $F_{'}$. Wird nun der Astigmatismus längs der Symmetrielinie stetig vermindert, so rücken die beiden anastigmatischen Fokalpunkte längs der τ-Linie deren Spitze immer näher, und die Krümmung der ς-Linie wird immer schärfer, um in dem Augenblicke, wo diese beiden Punkte mit den beiden Fokalpunkten in einen zusammenfallen, unendlich zu werden. In dem so entstandenen anastigmatischen symmetrischen Strahlenbündel hat somit auch die ς-Linie eine Spitze, und die Evolute derselben hat im Fokalpunkt den Krümmungsradius

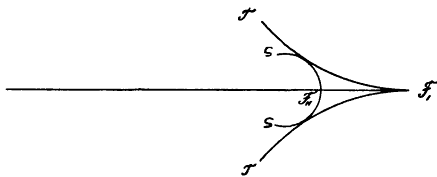


Fig. 121.

$$\frac{4\, G^3}{(A - 3\, G)^2}.$$

Von den verschiedenen Kategorien dieser Strahlenbündel ist diejenige, welche für die physiologische Optik von Bedeutung ist, dadurch charakterisiert, daß sämtliche Aberrationswerte dasselbe Vorzeichen haben, und die transversale Aberration in beiden Hauptschnitten numerisch kleiner ist als die direkte. Beide kaustischen Flächen liegen hierbei auf einer und derselben Seite der Fokalebene. Die erste, deren Schnittlinien mit den Hauptschnitten die τ-Linien ausmachen, ist ohne Kanten, und ihre Schnittlinien mit einer zur Fokalebene parallelen Ebene stellt in endlicher Entfernung vom Fokalpunkte eine geschlossene Linie dar, deren Krümmung überall einen endlichen Wert hat, während die zweite

immer zwei, den ϛ-Linien entsprechende durch den Fokalpunkt gehende Kanten hat, daneben aber auch noch zwei andere Kanten haben kann. Letzteres ist der Fall, wenn die Differenzen $A_1 - 3\,G$ und $A_2 - 3\,G$ dasselbe Vorzeichen haben. (Die beiden transversalen Aberrationswerte fallen, wie aus der oben angegebenen Beziehung derselben hervorgeht, im anastigmatischen Strahlenbündel zusammen.)

Je größer die Differenz $A_1 - A_2$, der Astigmatismus der Aberration ist, um so mehr tritt die Erscheinung eines mit der Blendengröße dem Grade nach wechselnden Astigmatismus zutage, da die Lage des für die Abbildung günstigsten Strahlenbündelquerschnittes von der Blendengröße und der direkten Aberration abhängig ist. Je weniger aber der Astigmatismus der Aberration in den Vordergrund tritt, um so mehr wird die Art der Strahlenvereinigung durch die Differenz $A_1 + A_2 - 6\,G$ bestimmt, welche den Diagonalastigmatismus der Aberration mißt. Die hierbei auf der zweiten kaustischen Fläche vorhandenen vier durch die Spitze gehenden Kanten bedingen auf einem zur Fokalebene parallelen Querschnitt derselben acht Spitzen, welche nach einem der beiden in der Fig. 122 dargestellten Typen angeordnet sind und besonders beim letzteren Typus strahlenähnliche Ausbuchtungen am Querschnitt des Strahlenbündels verursachen. Im Falle $A_1 = A_2 = 3\,G$ hat die Wellenfläche eine vollständige Berührung vierter Ordnung mit einer Umdrehungsfläche, oder kann auch eine solche darstellen. Im letzteren Falle schrumpft die zweite kaustische Fläche zur Umdrehungsachse zusammen, im ersteren hat sie eine von den Aberrationswerten höherer Ordnung abhängige größere Zahl von Kanten, welche nach demselben Schema angeordnet sind, und eine größere Zahl strahlenähnliche Ausbuchtungen am Querschnitte des Strahlenbündels verursachen.

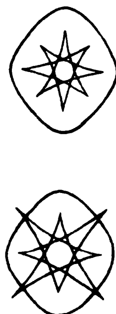


Fig. 122.

Den Aberrationswerten entsprechen auf der Wellenfläche die vier Abflachungswerte $\Phi_1\, \Omega_1\, \Omega_2\, \Phi_2$, von denen $\Phi_1\, \Omega_2$ die direkte bzw. transversale Abflachung im ersten bzw. zweiten Hauptschnitt messen, während $\Phi_2\, \Omega_1$ dieselbe Bedeutung für den zweiten Hauptschnitt haben. Es bestehen nun, wenn $D_1\, D_2$ die Hauptkrümmungen sind, die Relationen

$$A_1 = \frac{\Phi_1}{D_1^{\,4}},\quad G_1 = \frac{\Omega_1}{D_1^{\,2} D_2^{\,2}},\quad G_2 = \frac{\Omega_2}{D_1^{\,2} D_2^{\,2}},\quad A_2 = \frac{\Phi_2}{D_2^{\,4}},\quad \Omega_1 - \Omega_2 = D_1 D_2 (D_1 - D_2)$$

und es ist, wenn nunmehr $s_1\, s_2$ die Bogenlängen der Schnittlinien der Fläche mit dem ersten bzw. zweiten Hauptschnitt darstellen,

$$\Phi_1 = \frac{d^2 D_1}{d\,s_1^{\,2}},\quad \Omega_1 = \frac{d^2 D_1}{d\,s_2^{\,2}},\quad \Omega_2 = \frac{d^2 D_2}{d\,s_1^{\,2}},\quad \Phi_2 = \frac{d^2 D_2}{d\,s_2^{\,2}}.$$

Die Abflachungswerte sollen aber nur dazu angewendet werden, die brechenden Flächen eines Systems zu charakterisieren, während die Strahlenbündel durch die Aberrationswerte bestimmt werden. In einem Umdrehungssystem muß man somit, jeder Fläche entsprechend, den Abflachungswert Φ im Scheitel kennen, um den Aberrationswert auf der Achse berechnen zu können.

In den Fällen, wo eine kaustische Fläche mehrfache Schnittlinien mit einer Schirmebene hat, kommt, wie aus den allgemeinen Abbildungsgesetzen hervorgeht, eine mehrfache Abbildung des entsprechenden Liniensystems zustande.

Besonders leicht ist eine doppelte Abbildung von Linien im symmetrischen astigmatischen Strahlenbündel mit großen Aberrationswerten erhältlich, da die kaustische Fläche bei gewisser Schirmlage zwei parallele, nicht zu stark gekrümmte Schnittlinien mit der Schirmebene hat. Aber schon in Umdrehungssystemen, wo die kaustische Fläche des axialen Bündels eine kreisförmige Schnittlinie mit der achsensenkrechten Schirmebene hat, kann eine doppelte Abbildung einer kurzen, die Achse schneidenden Linie erhalten werden, indem die Schnittlinie, welche einem naheliegenden Hauptstrahle entspricht, annähernd dieselbe Form hat, und bei der Superposition der den verschiedenen Punkten der Objektlinie entsprechenden Kreise der Eindruck von zwei parallelen Linien entsteht, deren Zwischenraum jedoch heller als die Umgebung ist. Auf dieselbe Weise kann durch die im symmetrischen anastigmatischen Strahlenbündel an der zweiten kaustischen Fläche vorhandenen Kanten eine mehrfache Abbildung bedingt werden.

Es können also allgemein verschiedenen Schirmlagen verschiedene Abbildungen entsprechen. Welche Schirmlage die beste ist, hängt vom jeweiligen Charakter des abzubildenden Objektes und den Forderungen an Bildschärfe bzw. an Schleierfreiheit des Bildes ab. Für den axialen Bildpunkt in Umdrehungssystemen hat jedenfalls der aus dem Aberrationswert und der Blendengröße hergeleitete dünnste Querschnitt des Strahlenbündels nicht die demselben früher zugeschriebene Bedeutung. Im allgemeinen kann gesagt werden, daß die Schirmebene, je größer die Forderung an Wiedergabe kleiner Details ist, um so näher der Spitze der kaustischen Fläche belegen sein muß. Der von den Zerstreuungskreisen herrührende Schleier, welcher bei der Entfernung der Schirmlage von der Stelle des dünnsten Querschnittes zunimmt, bestimmt dann die Grenze der Leistungsfähigkeit des optischen Systems in bezug auf die betreffende Abbildung je nach dem Kontraste dieses Schleiers mit dem Querschnitte der kaustischen Fläche, d. h. je nach der Güte der Strahlenvereinigung.

Bei dieser Beschreibung[1] der wichtigsten Erscheinungen der monochromatischen Aberrationen unter ausschließlicher Anwendung mathematisch exakter Größen konnten die Beweise hier keinen Raum finden, sondern ich muß betreffs derselben auf meine einschlägigen, schon zitierten, Arbeiten verweisen. Die Brücke zur geläufigen Darstellung der Aberration in Umdrehungssystemen ist oben angedeutet. Die von den Asymmetriewerten herrührenden Abweichungen sind in der Literatur der geometrischen Optik unter dem Namen Koma bekannt, haben aber dort für endliche Hauptstrahlneigung bisher keine korrekte Darstellung gefunden.

[1] Eine etwas ausführlichere Beschreibung siehe: Die Konstitution des im Auge gebrochenen Strahlenbündels, Arch. f. Ophthalmologie. Bd. LIII, 2. 1901. S. 185.

II. Brechung der Strahlen im Auge. Abbildungsgesetze erster Ordnung.

1. Die Hornhaut.

Die vordere Hornhautfläche. Die Zeit, welche seit der Konstruktion des ersten Ophthalmometers durch HELMHOLTZ verflossen ist, hat große Fortschritte und wesentliche Umgestaltungen der Ophthalmometrie der Vorderfläche der Hornhaut gebracht. Zu einem Segen für die praktische Ophthalmologie und für die Menschheit ist diese physiologische Untersuchungsmethode geworden. Jeder beschäftigte Augenarzt wendet sie heutzutage täglich an. Wenn er aber dabei, an die bequeme Methode denkend, den Erfolg wesentlich den Verbesserungen zu schulden glaubt, so irrt er sich. Das Verdienst um die Methode ist und bleibt HELMHOLTZ' Eigentum, andere — in erster Linie JAVAL und SCHJÖTZ — haben das Verdienst der allgemeinen Einführung der Methode in die ophthalmologische Praxis. Daß die hierzu nötigen Veränderungen nicht ohne Opfer gemacht werden konnten, ist leicht verständlich, und wird dadurch bezeugt, daß der wissenschaftliche Forscher heute noch für die exakteren Untersuchungen auf die Originalkonstruktion von HELMHOLTZ rekurriert.

Das Prinzip des Ophthalmometers ist wesentlich dasselbe wie in dem unter dem Namen Heliometer bekannten astronomischen Instrumente und bezweckt die Messung eines beweglichen Gegenstandes durch die Verlegung der Ablesung bzw. Kollimation zum Gegenstande selbst. Dies geschieht dadurch, daß zwei optische Bilder vom Gegenstande in Kontakt gebracht werden, was einen optischen Verdoppelungs- und einen Kollimationsmechanismus voraussetzt. Beim Ophthalmometer von HELMHOLTZ sind beide in den beweglichen planparallelen Glasplatten vereinigt. Der Nachteil dieser Konstruktion ist nur nach zwei Richtungen fühlbar. Die erforderlichen wiederholten Einstellungen und Ablesungen sowie die Rechnungen bzw. die Interpolationen bei der Anwendung einer Tabelle bedingen einen unwillkommen großen Zeitaufwand und die Vorrichtungen, welche die Untersuchung anderer Normalschnitte als des horizontalen ermöglichen, sind zu schwerfällig oder unbequem, um dem Instrumente eine allgemeine Verbreitung schaffen zu können. Die Vorschläge zu Konstruktionsänderungen ließen auch nicht lange auf sich warten. COCCIUS[1] machte die Rechnungen und wiederholten Ablesungen dadurch überflüssig, daß er eine unveränderliche Verdoppelung — und zwar teils mit den Platten, teils auch mit einem doppeltbrechenden Kalkspathprisma — benutzte und die Kollimation durch Variation der Objektgröße erzielte. Bei der Anwendung der HELMHOLTZschen Platten wird das Objektiv gewissermaßen in zwei Teile getrennt, und es ist dasselbe folglich auch mit der Austrittspupille des Fernrohres der Fall, beim doppeltbrechenden Prisma dagegen ist die Austrittspupille des Instrumentes ungeteilt, und die beiden Doppelbilder können durch jeden Punkt derselben gesehen werden. (Unter Austrittspupille wird das vom Okular entworfene Bild der Objektivöffnung verstanden, welches als eine helle Scheibe sichtbar ist, wenn das Fernrohr gegen den Himmel gewendet wird und wenn man dabei im Abstande des deutlichen Sehens vom Okulare in der Richtung der Achse sieht.)

---

[1] A. COCCIUS, Über den Mechanismus der Akkommodation des menschlichen Auges. Leipzig 1867. Ophthalmometrie und Spannungsmessung am kranken Auge. Leipzig 1872.

Von diesen zwei Methoden der Verdoppelung — mit geteilter bzw. ungeteilter Austrittspupille — hat erstere den Nachteil, daß bei nicht vollkommen scharfer Einstellung eine Scheinverschiebung der Doppelbilder zueinander in einer zur Trennungslinie senkrechten Richtung stattfindet. Liegt die Trennungslinie in der Verdoppelungsebene, wie bei dem Ophthalmometer von HELMHOLTZ, so wird hierdurch zwar nicht die Genauigkeit des Messungsresultates beeinträchtigt, es kann aber eine Höhendifferenz, eine Denivellation vorgetäuscht werden, worauf weiter unten zurückzukommen ist. Anderseits haben die bisherigen Konstruktionen mit ungeteilter Austrittspupille den Nachteil der chromatischen Dispersion, welcher bei den planparallelen Platten beseitigt ist.

Zur Messung der Hornhautkrümmung in verschiedenen Normalschnitten wurde von MIDDELBURG[1] ein großer Ring angewendet, auf welchem die Lichter in verschiedenen Meridianen orientiert werden konnten, von WOINOW[2] und HELMHOLTZ[3] dagegen ein Spiegelapparat, welcher die Anwendung einer stabilen Lichtquelle ermöglichte. Bei diesen Vorrichtungen war die Erzielung der Kollimation durch Änderung der Objektgröße nicht recht ausführbar. Es wurden aber durch LANDOLT[4] mit einem zuerst als Diplometer beschriebenen Instrumente die beim Ophthalmometer nötigen wiederholten Ablesungen und die zeitraubenden Rechnungen derart vermieden, daß er die Platten durch Prismen ersetzte und die Kollimation durch Verschieben der Prismen längs der Achse des Instrumentes erreichte.

Bisher waren Flammen als Objekt bei der ophthalmometrischen Untersuchung verwendet worden. Sobald aber an deren Stelle das von weißen Flächen diffus reflektierte Licht trat, konnten die Veränderungen eingeführt werden, welche den Siegeszug der Ophthalmometrie im Gebiete der klinischen Forschung ermöglichten. JAVAL und SCHJÖTZ[5] benutzten als Objekt zwei diffus beleuchtete weiße Flächenstücke, welche längs einem Bogen verschieblich waren, dessen Zentrum im untersuchten Auge lag, und welcher um die Achse des Ophthalmometers gedreht werden konnte. Es konnte nunmehr die Untersuchung eines jeden beliebigen Normalschnittes mit derselben Leichtigkeit ausgeführt werden wie des horizontalen, es konnte die Kollimation mit Leichtigkeit durch die Verschiebung der weißen Flächen erreicht werden, die Vorteile der konstanten Verdoppelung ohne Teilung der Austrittspupille wurden durch die Anwendung eines WOLLASTONschen Prismas voll ausgenützt, und es wurden verschiedene praktische Konstruktionsdetails ersonnen, welche die leichte Handhabung des Instrumentes sicherten.

In der ersten Ausführung hatte das Ophthalmometer von JAVAL und SCHJÖTZ[5] das in der Fig. 123 dargestellte Aussehen. Bei E befindet sich eine Kerbe, bei G ein Stift, mit welchen bei der Einstellung des Instrumentes visiert wird, bei W liegt das WOLLASTONsche Prisma zwischen zwei Konvexlinsen ein-

[1] Der Sitz des Astigmatismus (nach MIDDELBURG). Eine schriftliche Mitteilung von F. C. DONDERS an A. v. GRAEFE. Arch. f. Ophth. X, 2. 1864. S. 83.

[2] M. WOINOW, Ophthalmometrie. Wien 1871.

[3] H. v. HELMHOLTZ, Handbuch der Physiologischen Optik. 2. Aufl. Hamburg und Leipzig 1896.

[4] E. LANDOLT, *L'ophthalmomètre, Compte rendu et mémoires du congrès international de Genève.* 1878.

[5] JAVAL und SCHJÖTZ, *Un ophthalmomètre pratique. Transactions of the international medical Congress.* VIII. Session. London 1881. III. S. 30. *Annales d'oculistique.* LXXXVI. 1881. S. 5.

geschlossen, von welchen die eine das vom Hornhautspiegelbilde kommende Licht parallel macht, die andere als Objektiv eines astronomischen Fernrohres dient, MM' sind die beiden weißen Flächen, „*mires*“. Dieselben hatten das in der Fig. 124 dargestellte Aussehen, wobei der Abstand D die Objektgröße repräsentierte, so daß die Kollimation an den Linien ab und cd geschah. Die treppenförmigen Stufen an der einen weißen Fläche waren so berechnet, daß beim sich gegenseitig Überdecken der Spiegelbilder jeder Stufe eine Dioptrie Hornhautrefraktion entsprach, wenn von dem Indexunterschiede der Hornhaut und des Kammerwassers abgesehen wurde. Das Resultat der Messung in einem

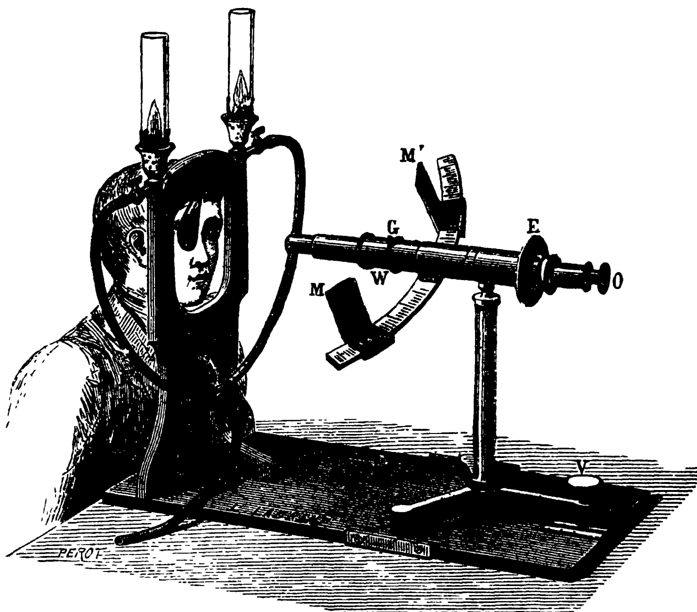


Fig. 123.

Hornhautschnitte erhielt man in der Gestalt einer Dioptriezahl D, welche durch die Gleichung

$$D = \frac{1000}{\varrho}(n-1)$$

bestimmt wird, in welcher ϱ den in Millimetern gemessenen Krümmungsradius darstellt und $n = 1{,}3375$ ist.

Da die Verdoppelung ohne Teilung der Austrittspupille zustande kommt, somit die bei dieser Teilung möglichen Scheinverschiebungen der Bilder ausgeschlossen sind, so bedeutet eine Denivellation, daß die Längendimension des Spiegelbildes nicht wie die des Objekts in der Verdoppelungsebene liegt, daß somit bei der Spiegelung in der Hornhaut eine Drehung stattgefunden hat. Gegenstand der Messung ist die Linie, welche den Mittelpunkt der Linie ab Fig. 124 mit dem der Linie cd verbindet. Wenn die Hornhaut eine auf der Achse des Instrumentes zentrierte Umdrehungsfläche darstellt, so ist diese Linie eine Meridianlinie, und dasselbe gilt vom Spiegelbilde derselben, so daß eine Denivellation ausgeschlossen ist. Ist aber die Hornhaut astigmatisch mit zwei

Symmetrieebenen, so ist die Objektlinie nur dann eine abbildbare Linie, wenn sie in einem der Hauptschnitte der Hornhaut orientiert ist, wobei die Bildlinie auch in demselben Hauptschnitt liegt, und die Denivellation wiederum ausgeschlossen ist. Wenn aber die Objektlinie zwischen den beiden Hauptschnitten orientiert ist, so entsteht das Spiegelbild durch optische Projektion. Man versinnlicht sich am einfachsten den Vorgang, indem man von den beiden Endpunkten der Objektlinie zwei auf den Hauptschnitten der Hornhaut senkrechte Linien zieht. Diese stellen dann ein Rechteck dar, dessen Diagonale mit der Objektlinie zusammenfällt, und dessen Seiten abbildbare Linien sind. Die beiden Dimensionen dieses Rechtecks im Spiegelbilde werden von den beiden zur Brechkraft der Hauptschnitte der Hornhaut angenähert umgekehrt proportionalen Vergrößerungskoeffizienten bestimmt, so daß das Spiegelbild ein Rechteck darstellt, dessen Seiten zwar unverändert orientiert sind, aber eine veränderte Proportion zueinander haben, was damit gleichbedeutend ist, daß die Diagonale nicht in derselben Ebene liegt wie am Objekte. Die Endpunkte derselben, welche bei der Messung kollimiert werden sollen, können dann nicht beide auf einmal in die Verdoppelungsebene gebracht werden, sondern es entsteht eine Denivellation. Der mathematische Inhalt dieses Beweises ist der, daß bei der optischen Projektion einer nicht in einem Hauptschnitte liegenden Linie die Neigung gegen die Hauptschnitte verändert wird, sobald die Projektionskoeffizienten für Linien, welche in den beiden Hauptschnitten verlaufen, verschiedene Werte haben, und daß diese Projektionskoeffizienten bei Vernachlässigung des Abstandes der den beiden Abbildungen entsprechenden Bildlinien voneinander mit den betreffenden Vergrößerungskoeffizienten zusammenfallen. Streng gültig ist dieser Beweis nur für eine sehr kleine Objektlinie. Der exakte Beweis kann für die angewendete Größe nur durch die Gesetze höherer Ordnung der optischen Projektion gegeben werden. Die Verhältnisse können bei erheblicher Asymmetrie im Baue der Hornhaut ziemlich komplizierte Probleme darbieten, aber, wenn eine Symmetrieebene vorhanden ist, kann man sicher sein, daß die Denivellation nur in derselben und in der senkrechten Ebene verschwindet, sobald die Achse des Instrumentes in der Symmetrieebene liegt.

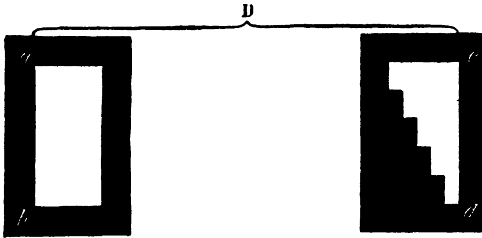


Fig. 124.

Die leichte Aufsuchung der in den regelmäßigeren Fällen durch Verschwinden der Denivellation charakterisierten Hauptschnitte, der bequeme Kollimationsmechanismus und die unmittelbare Ablesung des Messungsresultates, das sind die Hauptvorzüge des Ophthalmometers von Javal und Schjötz. Dieselben haben zusammen mit der handlichen Form des ganzen Instrumentes die Einführung der ophthalmometrischen Methode in die ophthalmologische Praxis ermöglicht.

Aber ohne Nachteile sind diese Veränderungen der ursprünglichen Konstruktion von Helmholtz nicht. Die Verdoppelung beträgt beinahe 3 mm. Unter der Voraussetzung, daß die Untersuchung in einer Symmetrieebene stattfindet, erhält man durch dieselbe ein Maß, welches von dem Winkel abhängig ist, den zwei in dieser Ebene verlaufende Normalen der Hornhaut miteinander

bilden, die in Punkten errichtet sind, welche ungefähr 3 mm voneinander entfernt liegen, ein Maß, welches nicht genau mit dem Krümmungsradius zusammenfällt; und auch dieses Maß ist nur bei einer bestimmten Größe vollkommen exakt (bei 45 Dioptrien), indem das Instrument für diesen Wert empirisch kontrolliert wird, die Teilung des Gradbogens aber nach den bei der angewendeten Objektgröße nicht vollkommen zuverläßlichen Abbildungsgesetzen erster Ordnung berechnet ist. Es entstehen hierdurch Fehler, welche durch die Konstruktion bedingt sind, und deren Elimination auf große Schwierigkeiten stößt. Dieselben sind zwar nicht von der Größenordnung, daß sie den Wert des Instrumentes beim Gebrauch in der ophthalmologischen Praxis beeinträchtigen, begrenzen aber jedenfalls die Anwendbarkeit der Messungsresultate für gewisse feinere physiologische Untersuchungen. Dazu kommen noch die bei der Einstellung und Kollimation möglichen Fehler. Was erstere betrifft, so wird der Abstand, für welchen die Teilung der Skala berechnet ist, eben nur durch die scharfe Einstellung auf dem Fadenkreuz gesichert, und die der Rechnung zugrunde gelegte Verdoppelung ist auch nur bei scharfer Einstellung mit der reellen übereinstimmend. Die hierdurch bei mangelhafter Schärfe der Einstellung entstehenden Fehler summieren sich. Ist z. B. das vom Objektive entworfene Bild zwischen diesem und dem Fadenkreuz belegen, der Abstand des Instrumentes vom untersuchten Auge somit zu groß, so müßte das Objekt, wenn die Verdoppelung unverändert bliebe, größer gemacht werden, um eine unveränderte Größe des Spiegelbildes zu geben. Die Kollimation geschieht in einem Punkte auf der Achse. Verfolgt man nun den Weg des Lichts rückwärts von diesem Punkte, so fällt der Hauptstrahl zunächst mit der Achse zusammen, teilt sich aber in dem Schnittpunkte derselben mit der Kittfläche des WOLLASTONschen Prismas. Die beiden Hauptstrahlen, welche das Spiegelbild in den zu kollimierenden Punkten treffen, divergieren also vom scheinbaren Ort dieses Punktes, und die Verdoppelung wächst mit dem Abstande des Instrumentes vom untersuchten Auge, so daß das Objekt noch größer gemacht werden muß, als wenn die Verdoppelung vom Abstande unabhängig wäre. Um diese Fehler möglichst zu vermeiden, ist eine sehr scharfe Einstellung auf dem Fadenkreuz erforderlich, und wenn es sich um genauere Untersuchungen handelt, tut man jedenfalls gut, den Rat von HELMHOLTZ[1] nicht zu vergessen, die Einstellung durch parallaktische Verschiebungen des eigenen Auges zu kontrollieren — wozu aber eine hinreichend große Okularöffnung erforderlich ist.

Was die Kollimationsfehler betrifft, so wirkt die chromatische Dispersion des Prismas unvorteilhaft ein, indem die zu kollimierenden Grenzlinien farbige Säume aufweisen, deren Aussehen von der Stärke und Zusammensetzung des angewendeten Lichts beeinflußt wird. Die modernen Instrumente haben durchscheinende Platten und elektrisches Glühlicht, bei welchem helle Spiegelbilder mit nur wenig störenden farbigen Säumen erhalten werden, da nämlich dieses Licht relativ arm an kurzwelligen Strahlen ist, das Spektrum somit wie verkürzt erscheint. Durch farbige Gläser kann dieser Nachteil noch weiter verringert werden. Von Einfluß auf die Größe der Kollimationsfehler ist auch die Form der zu kollimierenden Figuren, welche seit dem ersten Modell vielfache Modifikationen erfahren hat. Die erste Verbesserung betraf die zur Nivellierung

---

[1] Nach einer Angabe von JAVAL, *Contribution à l'ophthalmométrie. Annales d'oculistique.* LXXXVII. 1882. S. 213.

nötige Kollimation, indem die weißen Platten mit einem schwarzen in der Verdoppelungsebene liegenden Streifen versehen wurden, welche diesem Zwecke in vorzüglichster Weise dient, indem bei vollständiger Nivellierung nur ein ununterbrochener Streifen sichtbar ist und die Fähigkeit des Auges, eine kleine Verschiebung der beiden Teile dieses Streifens zueinander zu entdecken, eine sehr große ist. Überhaupt ist eine ähnliche Vorrichtung auch für die Kollimation bei der Messung die beste. Das mit den Stufen beabsichtigte Ziel einer bequemen Ablesung des Astigmatismus wird am besten dadurch erreicht, daß die eine Platte immer bei der Einstellung in dem zuerst untersuchten Hauptschnitte verschoben wird, wonach bei der Untersuchung des anderen Hauptschnittes die Kollimation durch Verschieben der anderen Platte erfolgt. Letztere Platte ist dann immer beim Beginn der Untersuchung auf den Nullpunkt der Skala zu bringen, welcher der symmetrischen Stellung der Platten bei richtiger Kollimation und beim Mittelwerte der Hornhautkrümmung entspricht. Nach beendigter Untersuchung liest man dann an der Stellung der ersten Platte die Krümmung im zuerst untersuchten Hauptschnitte ab, an der Stellung der zweiten den Grad und das Vorzeichen des Hornhautastigmatismus. An einer Skala, wo das Intervall von 1^0 einer Dioptrie entspricht, kann man z. B. den Nullpunkt am linken Arme des Bogens in den Abstand 22^0 von der Achse verlegen und eine bis zu 10^0 nach beiden Richtungen sich erstreckende Skala anbringen. An der Skala des rechten Arms trägt dann der zum Nullpunkt symmetrisch belegene Punkt die Zahl 44. Bei einer solchen Anordnung der Skala sind die Stufen an den zu kollimierenden Figuren überflüssig, so daß diese ausschließlich mit Hinsicht auf die schärfste Kollimation konstruiert werden können.

Es dürfte ersichtlich sein, daß die Untersuchungsfehler, auf welche man mit den modernen Ophthalmometern gefaßt sein muß — auch bei vollkommenster Übung und Geschicklichkeit des Untersuchers — nicht zu gering veranschlagt werden dürfen. Zwar dürfte der Kollimationsfehler, mit dem man bei den jetzt gebräuchlichen Instrumenten zu rechnen hat, den Betrag einer $^1/_4$ Dioptrie nicht überschreiten, vielmehr sogar bei vorteilhafter Konstruktion der zu kollimierenden Figuren etwas herabgedrückt werden können, aber die von der Geschicklichkeit des Untersuchers und der Ruhe des Kranken in hohem Grade abhängigen Einstellungsfehler dürften nur in den glücklichsten Fällen mit Sicherheit unter demselben Betrage bleiben, so daß man jedenfalls — die allergünstigsten Fälle ausgenommen — mit einem möglichen Fehler von $^1/_4$ bis $^1/_2$ Dioptrie zu rechnen hat. Wenn nun auch diese Fehler für die gewöhnlichen Zwecke der Praxis von untergeordneter Bedeutung sind, so können dieselben bei feineren Messungen des Hornhautastigmatismus bzw. bei Messungen des Radius in mehreren Punkten eines und desselben Hauptschnittes nicht außer Rechnung gelassen werden.

Bei der letztgenannten Untersuchung kommt noch die große Verdoppelung in Betracht. Will man den Nachteilen derselben entgehen, indem man ein Prisma mit der halben Verdoppelung wählt, so werden die Kollimationsfehler verdoppelt.

Außer dem Ophthalmometer von Javal und Schjötz, welches in einem Modell von 1889[1] einige Veränderungen erfuhr, seien hier nur einige andere kurz erwähnt. Der Mechaniker Kagenaar in Utrecht führte an Stelle des

---

[1] Sulzer, *Description de l'ophthalmomètre* Javal et Schjötz. *Modèle 1889* in den *Mémoires d'ophthalmométrie* par E. Javal. Paris 1890.

WOLLASTONschen Prismas eine Konstruktion mit einem Biprisma ein. Sein Ophthalmometer hat somit eine geteilte Austrittspupille, und die Trennungslinie steht vertikal auf der Verdoppelungsebene. Infolge dessen bestehen keine Schwierigkeiten der Nivellierung der Spiegelbilder, aber die bei geteilter Austrittspupille möglichen Scheinverschiebungen wirken auf das Messungsresultat ein, welches bei dieser Konstruktion also mit einer Fehlerquelle mehr belastet ist. Dagegen sind beim Ophthalmometer von LEROY und DUBOIS[1] die HELMHOLTZschen Platten, obwohl mit konstanter Verdoppelung, beibehalten, woraus eine Verminderung der Einstellungsfehler ceteris paribus resultiert, die oben erwähnte Schwierigkeit der Nivellierung aber anderseits die praktische Anwendung erschwert. Die in theoretischer Hinsicht vollkommenste Konstruktion wird vom SUTCLIFFE-Ophthalmometer[2] repräsentiert. Hier ist zwar die Austrittspupille geteilt — und sogar in fünf Teile — aber die hierdurch resultierenden Scheinverschiebungen sind in sinnreicher Weise zur Kontrolle der Schärfe der Einstellung verwendet. Zwei aufeinander senkrechte Normalschnitte werden zu gleicher Zeit gemessen, indem der Untersucher drei Bilder sieht. Bei der Untersuchung des vertikalen und horizontalen Normalschnittes liefert der mittlere Teil der Austrittspupille ein Bild, ein zweites entsteht durch den oberen und unteren Teil, während auf dieselbe Weise der rechte und linke Teil das dritte Bild liefert. Die bei mangelhafter Schärfe der Einstellung eintretenden Scheinverschiebungen bedingen bei dieser Konstruktion eine Verdoppelung der beiden letzterwähnten Bilder, welche erst bei richtiger Einstellung ausbleibt. Die Verdoppelung ist in den beiden aufeinander senkrechten Meridianebenen des Instrumentes variabel, das Objekt unveränderlich und von einer für die genaue Kollimation sehr günstigen Form. Wenn somit Einstellungs- und Kollimationsfehler auf ein Minimum herabgedrückt zu sein scheinen, so ist doch der größte Vorzug des Instrumentes darin zu erblicken, daß die richtige Kollimation mit einem Blicke für beide Hauptschnitte kontrolliert wird. Hierdurch wird eine viel größere Zuverlässigkeit der Messung des Hornhautastigmatismus erreicht, indem bei der gewöhnlichen Messung die den beiden successiven Einstellungen entsprechenden Fehler sich summieren können, wodurch ein im Verhältnis zum Grade des physiologischen Hornhautastigmatismus relativ großer Messungsfehler entstehen kann, der hier ausgeschlossen ist. Die praktische Anwendung dieses Instrumentes an der Upsala-Klinik hat die Vorzüge desselben bei der Untersuchung des Hornhautastigmatismus vollauf bestätigt.

Den großen Vorteil der Ermittelung des Astigmatismus durch eine einzige Messung kann man aber auch mit dem gewöhnlichen Ophthalmometer erreichen, indem derselbe, wie ich gezeigt habe[3], aus der Denivellation in einer einen Winkel von 45° mit den Hauptschnitten bildenden Ebene bestimmt werden kann. Zu diesem Zwecke braucht man nur die eine der weißen Platten am gewöhnlichen Ophthalmometer in einer zur Verdoppelungsebene senkrechten Richtung

[1] C. J. A. LEROY et R. DUBOIS, *Un nouvel ophthalmomètre pratique. Annales d'oculistique.* XCIX. 1888. S. 123.

[2] J. H. SUTCLIFFE, *One-position ophthalmometry. The optician and photographic trades review.* XXXIII. 1907. *Supplement* S. 8.

[3] A. GULLSTRAND, En praktisk metod att bestämma hornhinnans astigmatism genom den s. k. denivelleringen af de oftalmometriska bilderna. Nordisk Oftalmologisk Tidskrift. 1889.

verschieblich zu machen und eine entsprechende Skala anzubringen. Das einer Dioptrie entsprechende Intervall der Skala muß halb so groß sein wie das Intervall einer für die Messung der Radien bestimmten, in der Ebene der Kollimationsfigur belegenen Skala.

Der durch diese Methoden erreichte Vorteil der gleichzeitigen Messung der miteinander zu vergleichenden Radien kann, wenn es sich um die Radien in verschiedenen Punkten eines und desselben Hauptschnittes handelt, nur durch die Photographie des Hornhautspiegelbildes gewonnen werden. Solche Messungen sind zwar sehr zeitraubend und erfordern auch besonders dazu konstruierte Apparate, sind demnach als kurrente Untersuchungen ausgeschlossen, geben aber anderseits eine Genauigkeit der Resultate, welche bisher auf keine andere Weise erreicht werden konnte. Ich[1] verwandte seinerzeit dazu ein Objekt, welches in einem und demselben Hauptschnitte gleichzeitig den Radius in sieben Punkten gab. Die entsprechenden Objektteile waren so berechnet, daß ihre Spiegelbilder in einer sphärischen Fläche eine und dieselbe Größe hatten (bei einem Radius von 7,8 mm annähernd $^2/_3$ mm).

Nach dieser kurzgefaßten Darstellung der Mittel, mit welchen die jetzt in großer Zahl vorliegenden Untersuchungen der Form der vorderen Hornhautfläche ausgeführt worden sind, gehe ich zur Würdigung der Ergebnisse über. Wenn Helmholtz die Form der nicht astigmatischen Hornhaut annähernd als eine elliptische ansah, so war dies durch die damaligen Kenntnisse der geometrischen Optik vollkommen gerechtfertigt, da das dioptrische Verhalten eines Ellipsoides bekannt, die Asymmetrienwerte aber, welche das dioptrische Verhalten einer beliebigen Fläche charakterisieren, unbekannt geblieben waren. Sobald die Asymmetrie der Hornhaut in bezug auf die Gesichtslinie konstatiert war, gab es also kein besseres Mittel, als durch dieselbe die Konstanten des betreffenden Ellipsoides zu berechnen. Die Worte von Helmholtz[2], daß „bei der Hornhaut der Ausdruck ihrer Form durch ein Ellipsoid vorläufig eine große Annäherung gibt", gelten noch heute, obwohl spätere Untersuchungen dargelegt haben, daß eine andere Anschauung eine größere Annäherung gibt.

Blix[3] zeigte zuerst durch eine ganz eigenartige ophthalmometrische Methode, welche aber ihre größten Vorteile für die Ortsbestimmungen der brechenden Flächen im Auge hat und deshalb erst später beschrieben werden soll, daß die Form der Hornhaut beträchtliche Abweichungen von der eines Ellipsoides darbietet. Wie Aubert[4] dann zeigte, lassen sich diese Abweichungen am einfachsten dadurch ausdrücken, daß in einer zentral gelegenen „optischen Zone" die Variationen des Krümmungsradius geringer, in dem übrigen Teile der Hornhaut aber beträchtlicher sind, als es bei der elliptischen Krümmung der Fall sein mußte. Die Krümmung der optischen Zone, welche ungefähr der Größe einer mittelweiten Pupille entspricht, ist annähernd sphärisch, oder die erreichbare Genauigkeit der Ophthalmometermessungen gestatten es wenigstens

[1] Photographisch-ophthalmometrische und klinische Untersuchungen über die Hornhautrefraktion. Kungl. Sv. Vet. Akad. Handl. 1896. Bd. 28.

[2] Dieses Handbuch. 2. Auflage. S. 17.

[3] M. Blix, Oftalmometriska studier. Upsala Läkareförenings Förhandlingar. XV. 1880. S. 349.

[4] H. Aubert, Nähert sich die Hornhautkrümmung am meisten der einer Ellipse? Pflügers Arch. f. d. ges. Physiologie. XXXV. 1885. Die Genauigkeit der Ophthalmometermessungen. Ebenda XLIX. 1891.

nicht, die Konstanten eines Ellipsoides zu berechnen, welche die Abweichung ihrer Form von der sphärischen repräsentieren könnte. Näher lernte man durch die Untersuchungen von SULZER[1] und ERIKSEN[2] die Form der Hornhaut kennen, indem dieselben ein beträchtliches Beweismaterial dafür bieten, daß die periphere Abflachung der Hornhaut teils öfters asymmetrisch ist, sowohl in horizontaler wie in vertikaler Richtung, teils auch in der Mehrzahl der Fälle in letzterer Richtung schneller verläuft als in ersterer. Dagegen beruhen die Schlüsse, welche SULZER betreffend die Variation des Astigmatismus des Auges mit der Pupillengröße aus dem letzterwähnten Verhalten zieht, auf der falschen Vorstellung, daß vom Astigmatismus einer ringförmigen Zone der Hornhaut die Rede sein könnte, was mathematisch unmöglich ist, und die Schlüsse, welche ERIKSEN betreffend des Astigmatismus in verschiedenen Punkten der Hornhaut zieht, sind nichts anderes als mathematische Folgen der Abflachung nach der Peripherie.

Qualitativ sind diese Untersuchungen von SULZER und ERIKSEN beweisend, indem die oben angeführten Resultate aus einem Vergleiche der Abflachung in verschiedenen Richtungen hervorgehen. Quantitativ sind dieselben nicht in ebenso hohem Grade zuverlässig, weil die Messungen mit dem Ophthalmometer nur den Winkel zwischen zwei Hornhautnormalen ergeben, deren Abstand von der Größe der Verdoppelung im Instrumente bestimmt wird, die Messungen aber in kleineren Winkeldistanzen wiederholt wurden. Im Ophthalmometer von JAVAL und SCHJÖTZ ist der gemessene Winkel bei normaler Hornhautkrümmung und bei der gewöhnlich angewendeten Verdoppelung größer als 20°. Wird die Messung bei von 5° zu 5° veränderter Blickstellung wiederholt, so fällt das Spiegelbild der einen weißen Platte bei den vier folgenden Messungen noch innerhalb der zuerst gemessenen Partie, und die Annahme, daß diese fünf Messungen den Krümmungsradius in fünf verschiedenen Punkten gegeben haben, läßt sich deshalb nicht rechtfertigen. Diese Anmerkung trifft allerdings in geringerem Grade die Untersuchungen von ERIKSEN, da bei denselben eine Verdoppelung von nur 1 mm angewendet wurde. Die mathematische Verwertung der gefundenen Form der Hornhaut zur Untersuchung der Strahlenbrechung in derselben setzt aber voraus, daß bei jeder folgenden Messung der eine Endpunkt des Objekts in demselben Hornhautpunkt gespiegelt wird wie bei der vorher-

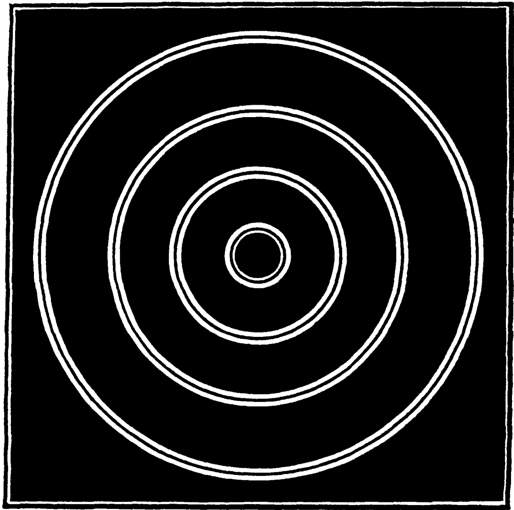


Fig. 125.

[1] *La forme de la cornée humaine et son influence sur la vision. Arch. d'Ophth.* XI. 1891. S. 419. XII. 1892. S. 32.

[2] Hornhindemaalinger. Aarhus 1893.

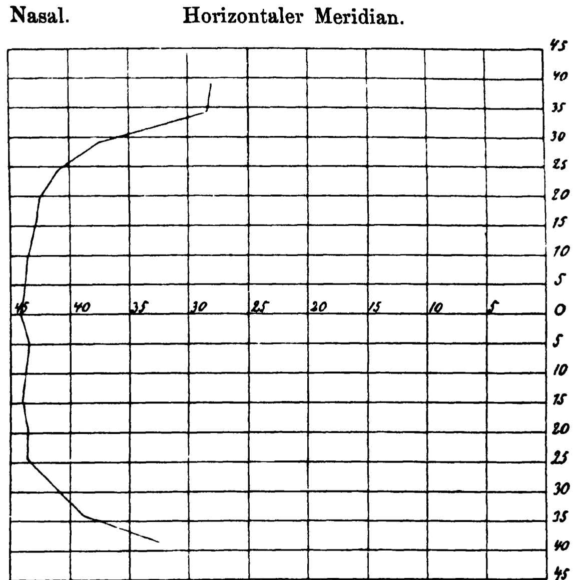
gehenden Messung der andere Endpunkt. Die Erfüllung dieser Bedingung unter Anwendung hinreichend kleiner Flächenelemente zur Messung ist bisher nur mit meiner photographischen Methode gelungen.

Als Objekt diente die in der Fig. 125 dargestellte Scheibe, welche so konstruiert war, daß im Spiegelbilde die Intervalle zwischen zwei Kreisen sich wie die Radien der entsprechenden Flächenelemente verhalten. Es wurde in fünf Blickrichtungen photographiert, nämlich beim Blick geradeaus ins Objektiv und bei solcher Drehung des Blickes in den vier Hauptrichtungen, daß das peripherste bei der zentralen Stellung gemessene Flächenelement genau mit dem zentralsten bei der peripheren Stellung gemessenen zusammenfiel. Die Messung der Photogramme geschah mit Teilmaschine und Mikroskop unter Korrektion mit den sorgfältig bestimmten periodischen Fehlern der Schraube. Die durch zahlreiche Untersuchungen kontrollierte Exaktheit der Messungen wurde durch die an der Figur sichtbare Teilung der Ringe in zwei erreicht, indem die scharfe Einstellung des Fadenkreuzes auf den im negativen Bilde hellen Zwischenraume ohne Schwierigkeit erfolgte. Durch die Konstruktion des Instrumentes waren die Winkel bekannt, welche die Hornhautnormale in den verschiedenen zur Spiegelung angewendeten Punkten mit der zur Gesichtslinie parallelen Normale bilden, und durch die Messung ergab sich der entsprechende Radius, indem derselbe als demjenigen Punkte angehörig angesehen wurde, wo die Normale gleiche Winkel mit den Normalen in den beiden das gemessene Element begrenzenden Punkten bildete. Als Resultat dieser Untersuchungen legte ich die vollständige Messung und Berechnung einer typisch normalen Hornhaut vor, von welcher hier einige Daten angegeben sein mögen.

Winkel der Normale im Zentrum des gemessenen Elementes	Vertikal		Horizontal	
	Oben	Unten	Innen	Außen
38° 55′ 30″	—	28,5	27,9	32,3
34° 3′ 50″	41,7	36,6	28,4	38,8
29° 14′ 20″	35,2	40,2	37,4	41,2
24° 24′ 50″	37,7	41,2	40,9	43,6
19° 33′ 10″	39,8	42,2	42,5	43,5
14° 37′ 10″	41,7	43,4	42,8	44,0
9° 41′ 10″	42,8	43,8	43,5	43,8
4° 49′ 30″	43,3	43,6	43,8	43,4
0° 0′ 0″	44,5		44,2	

Die Krümmungsradien sind hier unter Anwendung des in der Ophthalmometrie gebräuchlichen Index 1,3375 in Dioptrien umgerechnet. Die Figur 126 gibt eine graphische Darstellung des Inhalts dieser Tabelle nach dem von Eriksen gebrauchten Schema, und illustriert auffallend deutlich die relativ geringe Variation des Hornhautradius in den zentralen Teilen, die rapide Abflachung in den peripheren, sowie die Asymmetrie sowohl in vertikaler wie in horizontaler Richtung und die im Vertikalschnitte näher dem Zentrum beginnende Abflachung. Die Unebenheiten der Kurven repräsentieren die von der Methode unabhängigen, unvermeidlichen Beobachtungsfehler, welche davon herrühren, daß tatsächlich nicht die vordere Hornhautfläche, sondern die auf derselben liegende Flüssigkeitsschicht die erste brechende Fläche im dioptrischen System des Auges darstellt und die bei der ophthalmometrischen Untersuchung

angewendeten Spiegelbilder liefert. Ein Ausgleich dieser Unebenheiten würde zwar bei der photographischen Methode ohne Schwierigkeit mit exakten mathematischen Mitteln bewerkstelligt werden können, da immer sieben Maße auf einmal aufgenommen sind und zufolge der Konstruktion der Scheibe die bezüglichen Fehler nur darin bestehen können, daß von den Radien zweier angrenzender Elemente der eine um ebensoviel zu groß wie der andere zu klein ausgefallen ist. Es würde sich aber diese mathematische Arbeit kaum lohnen, denn obwohl man durch dieselbe die Krümmungsasymmetrie der Hornhaut in dem Inzidenzpunkte des bei der Abbildung im Auge wirksamen Hauptstrahles erfahren könnte, so würde dieser Wert bei unseren mangelnden Kenntnissen von der Form der Linsenflächen bis auf weiteres keine Anwendung finden können.



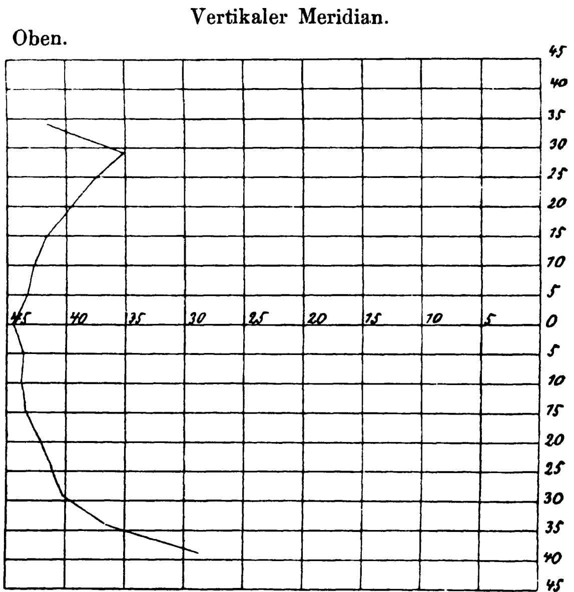


Fig. 126.

Es darf hier nicht unerwähnt bleiben, daß Matthiessen[1] einen Versuch gemacht hat, die Krümmung des oben dargestellten Horizontalschnittes mit einer elliptischen zu vergleichen. Ich hatte in einer Tabelle die Koordinaten sämtlicher bei der Spiegelung angewendeter Hornhautpunkte zusammengestellt, und aus diesen Koordinaten berechnete Matthiessen die tangierenden Ellipsen. Wäre nun die Krümmung elliptisch, so müßten die so gefundenen Ellipsen angenähert miteinander zusammenfallen. Da aber die große Halbachse dieser Ellipsen zwischen den

[1] L. Matthiessen, Über aplanatische Brechung und Spiegelung in Oberflächen zweiter Ordnung und die Hornhautrefraktion. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiologie. XCI. 1902. S. 295.

Werten 14,46 und 8,62 variiert, obwohl von der ersten Messung an der nasalen Seite und von den beiden ersten an der temporalen abgesehen wurde — somit der zentrale Teil der optischen Zone nicht in Betracht kam —, so kann ich die Übereinstimmung nicht befriedigend finden, wohl aber dem Schluß MATTHIESSENS beistimmen, daß sich aus den übrigen 15 Koordinaten eine Grundlage für die Herstellung einer Ellipse im horizontalen Hornhautschnitte ergibt, welche sich den Mittelwerten der Messungen anderer Autoren recht gut anschließt. Die Schlüsse, welche hieraus gezogen werden können, sind nur, daß beim Sehen mit mittelgroßer Pupille die Annahme einer sphärischen Gestalt des angewendeten Hornhautteiles die vorläufig beste Annäherung darstellt, während in den Fällen, wo die exzentrischen Teile der Hornhaut vorwiegend wirksam sind — wie bei gewissen Untersuchungen der Konstanten der Linse —, die Ellipse noch ihren Rangplatz als beste Annäherung beibehält.

Die in der Fig. 126 dargestellten Kurven geben die von SULZER und ERIKSEN gefundenen qualitativen Verhältnisse in treuester Weise wieder, was auch zu erwarten war, da dieselben einer typisch normalen Hornhaut entstammen und die Untersuchungen dieser Autoren eine große Anzahl Augen betreffen. Gemeinsam ist ferner, daß der Ausgangspunkt derjenigen Blickstellung entspricht, wo der Untersuchte gerade ins Objektiv des Instrumentes hineinschaut. Der in obenstehender Tabelle mit Null bezeichnete Punkt ist somit der Hornhautpunkt, in welchem die Normale zur Visierlinie parallel ist. Da bei der modernen klinischen Ophthalmometrie immer von diesem Punkte ausgegangen wird, mag derselbe der ophthalmometrische Achsenpunkt genannt werden.

Von diesem Punkte ausgehend, kann man am besten die Form der normalen Hornhaut dadurch charakterisieren, daß eine zentrale optische Zone besteht, in welcher die Krümmung annähernd sphärisch ist, deren Ausdehnung in horizontaler Richtung etwa 4 mm, in vertikaler etwas weniger beträgt und welche nach außen, gewöhnlich auch etwas nach unten dezentriert ist, und daß die peripheren Teile eine starke Abflachung zeigen, welche nasalwärts stärker ausgeprägt ist als temporalwärts, nach oben gewöhnlich mehr hervortritt als nach unten.

Beim Ausgang vom ophthalmometrischen Achsenpunkte ist auch die Pupille nach außen und gewöhnlich etwas nach unten dezentriert, und zwar in einem Grade, welcher annähernd der Dezentration der optischen Zone entspricht, so daß dieselbe in den typisch regelmäßigst gebauten Augen als annähernd auf die Pupille zentriert angesehen werden kann. Es empfiehlt sich deshalb, bei der Beurteilung der Zentrierung der brechenden Flächen des Auges, von der Hornhautnormale auszugehen, welche durch das Zentrum der Pupille geht und dieselbe als optische Achse des Auges zu bezeichnen. Da die brechenden Flächen nicht genau zentriert sind, so gibt es keine exakte optische Achse des Auges, sondern es muß eben eine Linie gewählt werden, welche die Forderungen an eine solche annähernd erfüllt. Die Orientierung dieser Achse ist leicht zu bestimmen, indem am Objektivende des Ophthalmometers oder eines Fernrohres eine durchbohrte runde weiße Scheibe angebracht wird, dessen Spiegelbild durch Bewegung des untersuchten Auges konzentrisch zur Pupille eingestellt wird, wobei die Verschiebung des Fixationszeichens die nötigen Daten ergibt.

Von größerem Gewicht für die Dioptrik der Hornhaut als dieses Maß ist aber der Einfallswinkel der Visierlinie und die Orientierung ihrer Ein-

fallsebene. Die spezielle Bedeutung der Visierlinie, welche in bezug auf die Abbildungsgesetze erster Ordnung den Hauptstrahl des beim scharfen Sehen wirksamen Strahlenbündels darstellt, und welche vom fixierten Gegenstand zum scheinbaren Mittelpunkt der Pupille geht, liegt teils darin, daß sie für die tatsächliche Strahlenvereinigung im Auge die Rolle spielt, welche bei der fiktiven kollinearen Abbildung der durch den vorderen Knotenpunkt gehenden Gesichtslinie zugeschrieben wird, teils aber auch darin, daß ihre Orientierung exakt festgestellt werden kann. Praktisch ist es zwar ziemlich gleichgültig, ob von der Visierlinie, der Blicklinie oder der Gesichtslinie gesprochen wird, wenn es sich um die Neigung zur optischen Achse handelt, da die Unterschiede unter der Grenze der möglichen Fehler fallen. Da aber die Lage der Visierlinie exakt bestimmt werden kann, die der Gesichtslinie nicht, so empfiehlt es sich überhaupt nur mit der ersteren zu rechnen, wie zuerst von Blix[1] hervorgehoben wurde. Der Einfallswinkel derselben wurde von Leroy[2] und dann von mir[3] gemessen. Die genauesten Resultate erhält man mit dem Helmholtzschen Ophthalmometer, indem die Fixationsmarke in der Verlängerung der Achse des Instrumentes angebracht und eine kleine Lichtquelle so eingestellt wird, daß ihr Spiegelbild in der Mitte der Pupille erscheint. Durch Drehen des Plattengehäuses am Ophthalmometer, bis die Lichtquelle in der Verdoppelungsebene liegt und durch Drehen der Platten, bis die Doppelbilder der Lichtquelle jede mit einem Rande der verdoppelten Pupille zusammenfallen, wird die richtige Stellung der Lichtquelle kontrolliert. Bei dieser scharfen Untersuchung zeigt es sich nun manchmal, daß der Einfallswinkel von der Pupillengröße abhängig ist, weshalb derselbe immer für eine mittlere Pupillengröße von 4 mm bestimmt werden sollte. Der Abstand der Lichtquelle von der Achse des Ophthalmometers, dividiert durch den Abstand des Hornhautscheitels von der zur Achse senkrechten Ebene, in welcher die Lichtquelle sich befindet, ist gleich der doppelten Tangente des gesuchten Einfallswinkels. Ohne Ophthalmometer bestimmt man denselben durch analoge Zentrierung des Spiegelbildes einer runden weißen Scheibe. Ich habe denselben in normalen Augen zwischen 0 und 6° variierend gefunden, habe aber auch negative Werte gesehen, wo also die Lichtquelle nasalwärts von der Achse des Instrumentes verschoben werden mußte. Der Winkel, den die Einfallsebene mit der Horizontalebene bildet, kann in vollkommen normalen Augen bis 30° betragen, dieselbe verläuft gewöhnlich in der Richtung von oben innen nach unten außen, wenn im vollkommen normalen Auge eine absehbare Abweichung von der horizontalen vorliegt. Bei sehr kleinen Werten des Einfallswinkels ist überhaupt jede Orientierung der Einfallsebene möglich. Der Winkel, den die Visierlinie mit der optischen Achse bildet, ist immer größer als der Einfallswinkel und beträgt in der Regel etwas mehr als das anderthalbfache desselben. Ist nämlich in der Fig. 127 P der wahre und P' der scheinbare Ort des Pupillenzentrums, u der Winkel, den die Visierlinie mit der optischen Achse bildet, und i der Einfallswinkel, so hat man, wenn d die scheinbare Tiefe der vorderen Kammer und ϱ den Krümmungsradius der optischen Zone der Hornhaut darstellt,

$$\sin u : \sin i = \varrho : (\varrho - d).$$

[1] a. a. O.

[2] *De la Kératoscopie ou de la forme de la surface cornéenne, déduite des images apparentes réfléchies par elle. Arch. d'ophth.* IV. 1884.

[3] A. a. O. Skand. Arch. f. Phys. II. 1890.

Bei kleinen Winkeln erhält man einen genügend genauen Wert, wenn man dieselben an Stelle der Sinus setzt, und findet so für eine scheinbare Tiefe der vorderen Kammer von 3 mm und einen Krümmungsradius von 7,8 mm das Verhältnis 1,625. Zu bemerken ist, daß von den S. 20 angeführten Messungen des Ortes des Pupillenzentrums in bezug auf die durch die Konstanten der Ellipse bestimmte Achse der Hornhaut, die erste eine bis auf die Größe der Beobachtungsfehler vollständige Übereinstimmung dieser Achse mit der hier angenommenen optischen Achse zeigt, während die in den beiden anderen hervortretenden Unterschiede nicht größer sind, als daß dieselben durch die Asymmetrie des horizontalen Hornhautschnittes und die dadurch bedingte Abweichung von der elliptischen Form erklärt werden können.

Es dürfte somit berechtigt sein, den Einfallswinkel der Visierlinie und den Winkel, den dieselbe mit der optischen Achse bildet, welche Winkel mit dem jetzt allgemein gebräuchlichen Instrumentarium leicht zu messen sind, an Stelle des von Helmholtz gebrauchten Winkels α zwischen der Gesichtslinie und der Achse der Hornhautellipse treten zu lassen. Der von Helmholtz[1] so genannte Winkel β, welcher auch in der Literatur sowohl α wie γ genannt wird, und welcher den Winkel der Blicklinie mit der durch das Zentrum der Hornhautbasis gehenden Hornhautnormale darstellt, dürfte jedenfalls ohne Bedeutung für die Dioptrik des Auges sein.

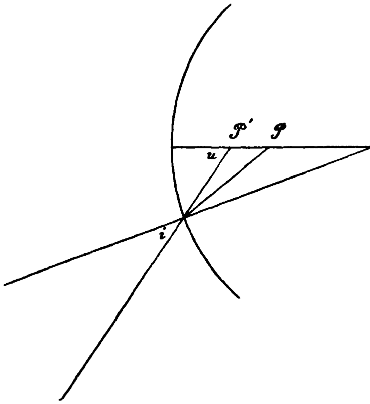


Fig. 127.

Was die Krümmung der optischen Zone der Hornhaut betrifft, so ist zufolge dem oben über die Genauigkeit der Messungen mit den modernen Ophthalmometern Gesagten den älteren Untersuchungen ein relativ hoher Wert beizulegen. Eine Zusammenstellung derselben wurde von Donders[2] gegeben. Bei 110 Männern war der Mittelwert 7,858 mm, während die Maximal- und Minimalwerte 8,396 bzw. 7,28 betrugen. Bei 46 Weibern waren die entsprechenden Werte 7,799, 8,487, 7,115. Im Anschluß an diese Zahlen nahm Helmholtz den schematischen Wert 7,829 an. Der modernen Ophthalmometrie stehen viel größere Zahlen zur Verfügung. An 1916 Augen fand Steiger[3] einen Mittelwert von 43,03 Dioptrien für die Hornhautrefraktion, was einem Radius von 7,843 mm entspricht. Sulzer[4] gibt den Mittelwert 43,7 Dioptrien an. Der entsprechende Hornhautradius ist 7,723 mm. Dieser Unterschied ist nicht größer, als daß derselbe durch die unvermeidlichen persönlichen Einstellungsfehler erklärt werden kann. In Anbetracht dessen, daß die dritte Dezimale nicht als sicher angesehen werden kann, und da das Material von Sulzer nicht so groß wie das von Steiger war, dürfte man der Wahrheit am nächsten kommen, wenn man den ophthalmometrischen Mittelwert des

[1] Dieses Handbuch. 2. Auflage. S. 19.
[2] F. C. Donders, *On the anomalies of accommodation and refraction.* London 1864.
[3] Adolf Steiger, Beiträge zur Physiologie und Pathologie der Hornhautrefraktion. Wiesbaden 1895.
[4] a. a. O

Krümmungsradius der optischen Zone der Hornhaut auf 7,8 mm veranschlagt und die physiologischen Grenzen im Anschluß an die obenstehenden Zahlen von DONDERS durch 7 bzw. 8,5 mm repräsentieren läßt — Zahlen, welche nunmehr allgemein angenommen sein dürften, und welchen jedenfalls nicht von exakten Untersuchungen widersprochen wird. Was die Grenzen betrifft, so kann die untere bei Mikrophthalmus und bei Keratokonus, die obere bei Abflachung der Hornhaut nach operativen Eingriffen bzw. nach Geschwürsbildungen überschritten werden, aber für die physiologischen Verhältnisse sind sie unter allen Umständen sehr weit gezogen. Aus den Zahlen von STEIGER geht hervor, daß wenigstens in etwa 80% die Variationen zwischen 7,5 und 8,1 mm begrenzt sind, indem die Refraktion 41,25 bis 45 Dioptrien in 88,5% gefunden wurde. Die durch die obenstehenden DONDERSschen Zahlen angedeutete Differenz der Hornhautkrümmung beider Geschlechter wird an dem größeren Materiale von STEIGER bestätigt (Mittelwert für Knaben 42,89, für Mädchen 43,15 Dioptrien). Nach seinen Untersuchungen soll eine Abflachung der Hornhaut bei zunehmendem Alter eintreten; es dürfte aber fraglich sein, ob das Material zur Entscheidung dieser Frage ausreichend ist. Eine Abhängigkeit des Hornhautradius von der Pupillendistanz geht aber aus seinen Untersuchungen hervor, wie eine ähnliche Abhängigkeit von Körpergröße und Kopfumfang durch die Untersuchungen von BOURGEOIS und TSCHERNING[1] angedeutet wird, indem ein größeres anthropometrisches Maß einem größeren Mittelwerte des Hornhautradius entspricht.

Wenn auch sowohl der horizontale wie der vertikale Durchschnitt der optischen Zone der Hornhaut annähernd eine sphärische Krümmung hat, so gilt dasselbe nicht für die Zone als Ganzes. Denn der normale Befund ist ein meßbarer Astigmatismus. Dieser physiologische Hornhautastigmatismus wurde schon durch die erste, von NORDENSON[2] ausgeführte ophthalmometrische Massenuntersuchung sichergestellt. Wie aus dem einstimmigen Resultate der verschiedenen Untersucher hervorgeht, beträgt derselbe im Mittel 0,50—0,75 D., wobei der am schwächsten gekrümmte Hauptschnitt wenig von der horizontalen Richtung bzw. von der Längsrichtung der Augenspalte abweicht. Als Beleg hierfür können die Zahlen von STEIGER dienen. An einem Materiale von 3170 Augen fand er einen Mittelwert von 0,78 D. Wurden aber die Augen mit einem 2,0 D. übersteigenden Astigmatismus, die jedenfalls als pathologisch anzusehen sind, ausgesondert, so erhielt er für 3073 Augen einen Durchschnitt von 0,70 D., und zwar bestand in $^2/_3$ dieser Augen ein Hornhautastigmatismus zwischen 0,50 und 1,0, in fast $^7/_8$ derselben ein Hornhautastigmatismus von 0,25—1,25 D. Die Richtung des Hauptschnittes schwächster Krümmung war in 89,4% der Augen wagrecht.

Eine Veränderung des Hornhautastigmatismus mit dem Alter ist durch die Untersuchungen von SCHÖN[3], STEIGER und PFALZ[4] sicher bewiesen.

---

[1] *Recherches sur les relations qui existent entre la courbure de la cornée, la circonférence de la tête et la taille. Ann. d'oculistique.* XCVI. 1886.

[2] E. NORDENSON, *Recherches ophthalmométriques sur l'astigmatisme de la cornée chez les écoliers de sept à vingt ans.* Ebenda. XC. 1883.

[3] W. SCHÖN, Die Akkommodationsüberanstrengung usw. Arch. f. Ophth. XXXIII. 1. 1887.

[4] G. PFALZ, Über Astigmatismus perversus — eine erworbene Refraktionsanomalie Zeitschr. f. Augenheilkunde. III. 1900.

Der Astigmatismus wird, je nachdem der Hauptschnitt schwächster Krümmung einen 30° nicht übersteigenden Winkel mit der Horizontal- bzw. der Vertikalebene bildet oder mit diesen zusammenfällt als direkt bzw. invers bezeichnet (in der Literatur kommen auch die Bezeichnungen As. rectus, perversus vor) und die mit dem Alter eintretenden Veränderungen können dadurch definiert werden, daß der physiologische direkte Astigmatismus abnimmt, die Prozentzahl der Fälle mit inversem Hornhautastigmatismus zunimmt. In Zusammenhang mit dieser Veränderung steht eine Zunahme der Zahl der Fälle, in welchen die Hauptschnitte des Astigmatismus von der Horizontal- und Vertikalebene abweichen, wie auch leicht erklärlich ist, da statische Einflüsse, welche bei deutlichem Astigmatismus nicht hinreichen, um eine merkbare Formveränderung der Hornhaut zu bewirken, bei immer mehr abnehmendem Astigmatismus immer deutlicher hervortreten müssen.

Diejenige geometrische Fläche, welche die Form der optischen Zone der Hornhaut angibt, wenn die Krümmung derselben sowohl in horizontaler wie in vertikaler Richtung als sphärisch angesehen wird, ist die torische. Eine solche Fläche wird von einem Kreissegmente beschrieben, wenn dasselbe um eine in seiner Ebene gelegene Achse gedreht wird, oder stellt, wie die geometrische Definition lautet, die einhüllende Fläche einer Kugel dar, deren Zentrum sich längs eines Kreises bewegt.

Die Form eines senkrecht zur ophthalmometrischen Achse der Hornhaut gelegten Schnittes der vorderen Fläche ist in unendlich kleinem Abstande vom ophthalmometrischen Achsenpunkte laut einem allgemeingültigen flächengeometrischen Gesetze (dem Theorem von Dupin) elliptisch, und die Achsen der Ellipse verhalten sich wie die Quadratwurzeln der Hauptkrümmungsradien, so daß bei normalem physiologischem Astigmatismus die vertikale Achse die kleinere ist. Denkt man sich aber successive solche Schnitte durch die Hornhaut gelegt, und beurteilt man die Form der Schnittlinien nach dem Verhältnis des horizontalen zum vertikalen Durchmesser der Schnittlinie, so ändert sich zufolge der im vertikalen Hauptschnitte der Hornhaut ausgiebigeren Abflachung die Form der Schnittlinien derart, daß, je tiefer man kommt, dieses Verhältnis um so geringer wird. In welcher Tiefe dasselbe den Wert Eins passiert, bleibt vorläufig unbekannt. Daß dies aber vor Erreichung der Hornhautbasis eintrifft, geht für den oben durch Kurven illustrierten Fall — den einzigen, der bis jetzt eine solche Untersuchung gestattet — aus den ausgerechneten Koordinaten hervor. Es genügt, aus der betreffenden Tabelle drei Punkte in jeder Richtung hier anzuführen.

Nasal		Temporal		Oben		Unten	
x	y	x	y	x	y	x	y
0,860	3,556	0,831	3,483	0,905	3,680	0,856	3,541
1,231	4,218	1,168	4,084	1,298	4,383	1,201	4,157
1,792	5,048	1,579	4,692	1,680	4,948	1,636	4,801

In dieser Tabelle ist x der Abstand des Schnittes vom ophthalmometrischen Achsenpunkte, y der Abstand des Flächenpunktes von der ophthalmometrischen Achse. Konstruiert man die 12 Punkte, so findet man, daß bei einem und demselben x-Wert die y-Werte nach oben größer sind als nasalwärts, nach unten größer als temporalwärts, daß somit der vertikale Durchmesser des Schnittes größer ist als der horizontale. Dies setzt aber voraus, daß der

vordere Bulbusabschnitt eine ähnliche Form hat, und es geht somit aus der in vertikaler Richtung bedeutenderen Abflachung der normalen Hornhaut hervor, daß ein durch den vorderen Bulbusabschnitt hinter der Hornhaut senkrecht zur Visierlinie gelegter Schnitt einen größeren vertikalen als horizontalen Durchmesser haben muß. Hieraus folgt weiter, daß, wenn die Hornhaut ohne Einwirkung äußerer Kräfte wäre, die natürliche Form derselben durch einen inversen Astigmatismus repräsentiert sein müßte. Die Art der Abweichung der tatsächlichen Form der Hornhaut von dieser natürlichen entspricht vollkommen den einwirkenden äußeren Kräften, welche durch den Druck der Augenlider gegeben sind. Da dieser Druck nur in der Richtung nach oben und nach unten wirksam ist und wegen des Baues der Lidspalte in ersterer Richtung kräftiger sein muß als in letzterer, so muß derselbe entsprechend der Berührungsfläche eine Abflachung bewirken, welche nur den vertikalen Hauptschnitt betrifft und oben ausgeprägter sein muß als unten. Die Zusammenpressung von oben nach unten muß wieder einen direkten Astigmatismus der optischen Zone zur Folge haben. Daß dieser Mechanismus in qualitativer Hinsicht genügt, um die Form der Hornhaut zu erklären, ist einleuchtend, da die Berührungsfläche wenigstens des oberen Lides mit dem Bulbus sich über die Hornhaut ausdehnt, was gewöhnlich bei der im menschlichen Leben überwiegenden Blickrichtung nach unten von der Horizontalebene auch für das untere Lid, obwohl nicht in demselben Grade, gültig ist.

Für die Ansicht, daß dieser Mechanismus auch quantitativ genügt, sprechen mehrere Tatsachen. Zunächst entspricht die Abweichung der tatsächlichen Form der Hornhaut von der natürlichen einer äußerst geringen Deformation, welche wohl durch das Einwirken der durch den Druck der Augenlider gegebenen Kräfte auf die bei der Entstehung der Form der Hornhaut wirksamen Prozesse bedingt werden könnte. Dann ist es aber auch leicht bei der ophthalmometrischen Untersuchung zu zeigen, daß eine willkürliche Vermehrung dieser Kräfte eine momentan eintretende Deformation verursacht, indem beim Zusammenkneifen der Lider der Astigmatismus beträchtlich vermehrt werden kann und eine ausgeprägte vertikale Asymmetrie der Hornhaut mit stärkerer Abflachung nach oben auftritt. Und in den Fällen, wo die Hornhaut in abnormem Grade nachgibt, wobei ein Keratokonus entsteht, tritt die Einwirkung dieser äußeren Kräfte in prägnantester Weise dadurch zutage, daß, wie ich zeigen konnte, ein hochgradiger direkter Astigmatismus am Scheitel der Hornhaut, sowie eine starke vertikale Asymmetrie mit Dezentration des Scheitels nach unten und stärkerer Abflachung nach oben zum typischen Bilde gehört und in der Mehrzahl der Fälle beobachtet wird.[1] Im hohen Alter werden die Bulbushüllen rigider und der Druck der Augenlider nimmt ab, indem der allgemeine Tonus der Gewebe geringer wird und das Fettpolster in der Orbita schwindet. Es muß deshalb die Abweichung der tatsächlichen Form der Hornhaut von der natürlichen geringer werden, und in Übereinstimmung hiermit zeigt STEIGERS Statistik ein beträchtliches Zunehmen der Fälle mit inversem Hornhautastigmatismus im hohen Alter. Endlich muß bei Drucksteigerung die Einwirkung des Augenliddruckes gegenüber der des Binnendruckes zurücktreten lie Hornhaut somit ihre natürliche Form annehmen, und es haben auch

[1] Ett fall af keratoconus med tydlig pulsation af hornhinnan. Nord. Ophth. Tidskr. [V. 1892. S. 142.

klinische Untersuchungen von MARTIN[1] und PFALZ[2], sowie experimentelle von EISSEN[3] dargetan, daß bei Drucksteigerung im normalen Auge ein inverser Hornhautastigmatismus auftritt. Es zeigt sich also, daß in den Fällen, wo die Einwirkung des Augenliddruckes begünstigt wird, eine Vermehrung, in den Fällen, wo derselbe ausgeschaltet wird, eine Verminderung der Deformation eintritt, durch welche sich die tatsächliche Form der Hornhaut von der entsprechend der Gestaltung des vorderen Bulbusabschnittes natürlichen unterscheidet. Der Schluß scheint mir deshalb gerechtfertigt, daß der Druck der Augenlider bzw. der Widerstand, den dieselben dem Wachstum des Bulbus entgegensetzen, die Ursache abgibt für den normalen direkten Astigmatismus der optischen Zone, sowie für das Überwiegen der peripheren Abflachung im Vertikalschnitte und für die normale vertikale Asymmetrie dieser Abflachung.

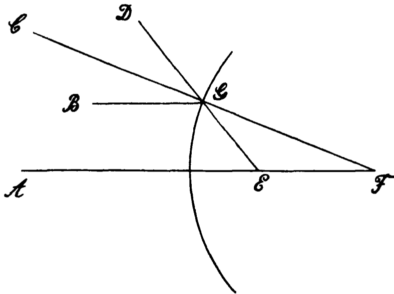


Fig. 128.

Die Berechnung der Hornhautform aus den Ophthalmometermessungen geschieht auf folgende Weise. Es sei in der Fig. 128 AEF die ophthalmometrische Achse, DGE der von einem Objektpunkte kommende Strahl, welcher nach der Spiegelung in der Hornhaut in der Richtung GB zum Ophthalmometer geht, und CGF die Normale der Hornhaut im spiegelnden Punkte, welche mit der ophthalmometrischen Achse den Winkel $CFA = \varphi$ bildet. Beim Gebrauche des Ophthalmometers von HELMHOLTZ oder eines Instrumentes mit ähnlicher Verdoppelungsvorrichtung ist die Linie BG parallel zur Linie AF. Folglich ist der Einfallswinkel gleich φ und der Winkel $DEA = 2\varphi$. Bei anderen Instrumenten macht die Linie BG einen kleinen Winkel mit der ophthalmometrischen Achse, welcher jedoch bei dem Verhältnis des Abstandes des Ophthalmometers zum Hornhautradius und bei den sonst der Genauigkeit der Messungen gesetzten Grenzen vernachlässigt werden darf. Dasselbe gilt von dem Abstande des Punktes E von der Hornhaut. Man erhält also entweder direkt am Gradbogen den Winkel 2φ durch den Winkelabstand des Objektpunktes von der Ophthalmometerachse, oder man erhält die Tangente des Winkels 2φ, indem man den Abstand des Objektpunktes von der Ophthalmometerachse durch den Abstand der achsensenkrechten Ebene, in welcher er enthalten ist, von der Hornhaut dividiert. Auf diese Weise ist der einem beliebigen Objektpunkte entsprechende Winkel φ immer mit hinreichender Genauigkeit bekannt. Es sei nun wiederum in der Fig. 129 AF die ophthalmometrische Achse und es mag das Licht von zwei verschiedenen Objektpunkten in den beiden Hornhautpunkten B C gespiegelt werden, in welchen die Normalen gezogen werden. Der Schnittpunkt G dieser Normalen fällt um so genauer mit dem Krümmungsmittelpunkte des Elementes BC zusammen, je kleiner dieses

[1] G. MARTIN, *Études d'ophthalmométrie clinique. Ann. d'oculistique.* XCIII. 1885. S. 223.

[2] G. PFALZ, Ophthalmometrische Untersuchungen über Kornealastigmatismus. Arch. f. Ophth. XXXI. 1. 1885. S. 201.

[3] W. EISSEN, Hornhautkrümmung bei erhöhtem intraokularem Druck. Ebenda. XXXIII. 2. 1888. S. 1.

ist, und der Abstand $BG = CG$ ist der Krümmungsradius ϱ. Durch G wird eine Linie parallel zur Achse gezogen und auf diese die Lotlinien von den Punkten $B\,C$ gefällt. Werden nun die Abstände der Punkte $B\,C$ von der Achse mit $y_1\,y_2$, die Abstände der Linien BD, CE vom Achsenpunkte der Hornhaut mit $x_1\,x_2$ und die Winkel BGD, CGE mit $\varphi_1\,\varphi_2$ bezeichnet, so hat man zunächst

$$BD = \varrho \sin \varphi_1\,, \qquad CE = \varrho \sin \varphi_2\,,$$

und, da $CE - BD = y_2 - y_1$ ist, so ergibt sich die allgemeine Formel zur Berechnung des Krümmungsradius

$$\varrho = \frac{y_2 - y_1}{\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1}\,,$$

in welcher $y_2 - y_1$ durch den Betrag der Verdoppelung gegeben ist, $\varphi_1\,\varphi_2$ durch die Lage der Objektpunkte bekannt sind. In dem speziellen Falle, wo dieselben symmetrisch zur Ophthalmometerachse liegen, und somit $\varphi_2 = -\varphi_1$ ist, kann die Formel in der ihr von HELMHOLTZ[1] gegebenen Gestalt

$$\varrho = \frac{\beta}{2 \sin \left(\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{b}{2\,a}\right)}$$

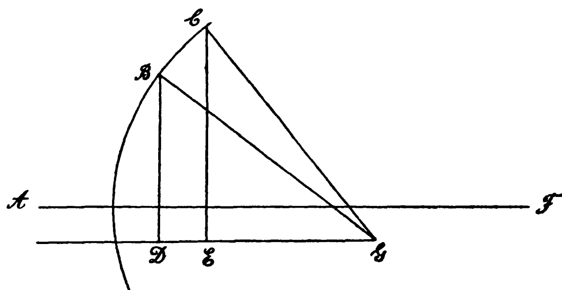


Fig. 129.

geschrieben werden, wo β den Betrag der Verdoppelung, b den Abstand der im Spiegelbilde kollimierten Objektpunkte voneinander und a den Abstand der dieselben verbindenden Linie von der Hornhaut bedeutet, und welche, je kleiner die Winkel sind, um so genauer mit der approximativen Formel

$$\varrho = \frac{2\,a\,\beta}{b} \quad \text{bzw.} \quad D = k\,b$$

zusammenfällt, welche in der letzteren Gestalt, wo k die Ophthalmometerkonstante darstellt, der modernen Ophthalmometrie zugrunde gelegt wird.

Bei der Ausführung von Messungen in anderen Blickrichtungen hat man dieselben so zu wählen, daß jedesmal ein in der vorhergehenden Messung zur Spiegelung angewendeter Hornhautpunkt auch in der folgenden zur Verwendung kommt, indem es sonst nicht möglich ist, die Messungen zur Berechnung der Form der Hornhaut zu verwenden. In dieser sekundären Blickstellung ergibt die Messung dann eine Anzahl Radien und die entsprechenden Winkel φ in bezug auf die sekundäre Achse. Dieselben werden zunächst durch Addition mit dem Betrage der Drehung der Blicklinie in die in bezug auf die ophthalmometrische Achse der Hornhaut gültigen Winkel φ umgerechnet, wonach die y-Werte in bezug auf diese Achse durch die allgemeine Formel erhalten werden. Die x-Werte erhält man unter Beachtung der aus der Fig. 129 hervorgehenden Beziehungen

$$GD = \varrho \cos \varphi_1\,, \qquad GE = \varrho \cos \varphi_2\,, \qquad GD - GE = x_2 - x_1\,,$$

[1] Dieses Handbuch. 2. Aufl. S. 16.

durch die Formel

$$x_2 - x_1 = \varrho(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)$$

und als Resultat der Berechnung hat man somit die Koordinaten der zur Spiegelung verwendeten Hornhautpunkte, die Neigung der Normalen in diesen Punkten und die Krümmungsradien der zwischen denselben belegenen Elemente des gemessenen Normalschnittes, Daten, welche hinreichend — aber auch notwendig — sind, um durch trigonometrische Rechnung die Einwirkung der Hornhaut auf die Aberration zu untersuchen.

Die exakte Berechnung der Form einer Hornhaut ist bisher nur bei der photographisch-ophthalmometrischen Untersuchung ausgeführt worden. Derselben kann aber auch eine mit dem Ophthalmometer von HELMHOLTZ entsprechend ausgeführte Messungsserie zugrunde gelegt werden. Auch das JAVALsche Ophthalmometer kann nach verschiedenen Methoden dazu angewandt werden. Eine prinzipiell einwandfreie solche Methode ist von BRUDZEWSKI[1] und BASLINI[2] angegeben worden. Die Berechnung der Messungsresultate ist aber bei beiden unrichtig, indem ersterer eine nur für Flächen zweiten Grades gültige Beziehung zwischen Krümmungsradius und Normale anwendet, letzterer die x-Werte nach einer nur für einen Kreis geltenden Formel berechnet. Will man die Form der Hornhaut unter Anwendung der für ein Ellipsoid gültigen Gesetze berechnen, so tut man ohne Zweifel besser, dies konsequent durchzuführen und die Konstanten des Ellipsoides nach der von HELMHOLTZ[3] angegebenen Methode aus drei Radien zu berechnen.

Die oben angegebene Regel für die Berechnung des Astigmatismus aus dem Betrage der Denivellation in einer Richtung, welche den Winkel von 45° mit den Hauptschnitten bildet, ergibt sich auf folgende Weise. Wird nach Ermittelung eines Hauptschnittes der Hornhaut der Bogen des Ophthalmometers um einen halben rechten Winkel gedreht und dann die Kollimation hergestellt und die Denivellation durch Verschieben der einen weißen Figur in der zur Verdoppelungsebene senkrechten Richtung ausgeglichen, so sind die kollimierten Punkte die Endpunkte einer Linie, deren im Fokus des Ophthalmometers gelegene optische Projektion in der Verdoppelungsebene liegt. Der Abstand dieses Fokus von den beiden nicht exakt in derselben Ebene liegenden Fokalpunkten des gespiegelten Strahlenbündels kann bei der erzielbaren Genauigkeit vernachlässigt werden, und es sind dann die beiden den Hauptschnitten entsprechenden Projektionskoeffizienten, wie aus der Formel S. 250 hervorgeht, gleich den betreffenden Vergrößerungskoeffizienten, welche sich wiederum umgekehrt wie die Brechkraft in den beiden Hauptschnitten verhalten, indem

$$K_1 D_1 = K_2 D_2 = L$$

ist, wo K D Vergrößerungskoeffizienten und Brechkräfte, L die im Fokus des Hornhautspiegels gemessene Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels bedeutet. Die Tangente des Winkels, den die projizierte Linie mit dem ersten Hauptschnitt bildet, ist $\frac{K_2}{K_1}\operatorname{tg}\omega$, wenn ω den Winkel darstellt, den die zu pro-

---

[1] K. v. BRUDZEWSKI, Beitrag zur Dioptrik des Auges. Arch. f. Augenheilk. XL. 1900. S. 296.

[2] C. BASLINI, *Recherches ophthalmométriques. Arch. d'ophth.* XXIV. 1904. S. 565.

[3] Dieses Handbuch. 2. Aufl. S. 17

jizierende Linie mit demselben Hauptschnitt bildet. Da jene Tangente gleich 1 ist, so hat man $\operatorname{tg}\omega = \frac{D_2}{D_1}$ und somit

$$\operatorname{tg}(\omega - 45^0) = \frac{D_2 - D_1}{D_2 + D_1} = \frac{c}{b},$$

wo c die zur Aufhebung der Denivellation erforderliche Verschiebung, b die durch die Kollimation bestimmte Länge der zu projizierenden Linie darstellt. Zufolge dem Theoreme von EULER hat man unter Anwendung der Ophthalmometerkonstante $\frac{1}{2}(D_1 + D_2) = kb$, wodurch sich der mathematische Ausdruck der oben angegebenen Regel

$$D_2 - D_1 = 2kc$$

ergibt. Diese Formel ist somit approximativ in demselben Grade wie die allgemein in der modernen Ophthalmometrie angewendete. Die durch die Approximation bedingten Fehler sind aber bei der Messung des Astigmatismus ohne Belang und kommen erst bei der Berechnung des absoluten Betrages der Hornhautrefraktion in Betracht.

Die Hornhautsubstanz. Von der die vordere Hornhautfläche bedeckenden Flüssigkeitsschicht abgesehen, welche in der Dioptrik des Auges als unendlich dünn mit konzentrischen Grenzflächen betrachtet werden kann und demnach ohne Bedeutung für den Strahlengang ist, stellt das Hornhautgewebe das erste brechende Medium des Auges dar. Der Brechungsindex desselben wurde nach Einführung der modernen refraktometrischen Untersuchung durch ABBE von AUBERT und MATTHIESSEN[1] an den Augen eines 50jährigen Mannes und eines zwei Tage alten Kindes zu 1,377 bzw. 1,3721 bestimmt. Ein von LOHNSTEIN[2] aus den Brechungsindices der Bestandteile berechneter Wert liegt zwischen diesen Werten. Die letzte Zusammenstellung MATTHIESSENS[3] ergab 1,3763, weshalb, da die vierte Dezimale jedenfalls unsicher ist, am besten der Wert 1,376 als der schematische angenommen wird.

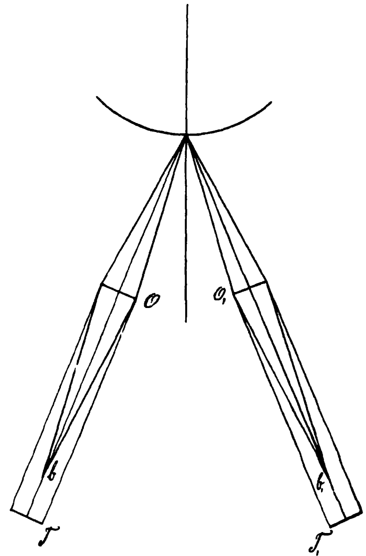


Fig. 130.

Die Dicke der Hornhaut ist mit einwandfreier Methode bisher nur von BLIX[4] am lebenden Auge gemessen worden. Sein Ophthalmometer besteht aus zwei nach dem Schema der Fig. 130 angeordneten Mikroskopen $T\,T_1$ mit den Objektiven $O\,O_1$. Im letzteren ist das Okular durch ein hell erleuchtetes Diaphragma b_1 ersetzt, dessen Bild im Schnittpunkte der Achsen entsteht. Da das andere Mikroskop, durch welches der Untersucher hinsieht, mittels des

[1] H. AUBERT, Grundzüge der physiologischen Optik. Leipzig 1876.

[2] TH. LOHNSTEIN, Über den Brechungsindex der menschlichen Hornhaut. Arch. f. d. ges. Physiologie. LXVI. 1897.

[3] L. MATTHIESSEN, Die neueren Fortschritte in unserer Kenntnis von dem optischen Baue des Auges der Wirbeltiere. Hamburg 1891.

[4] a. a. O.

Fadenkreuzes b auf diesen Schnittpunkt eingestellt ist, so wird das Bild des Diaphragmas nur dann scharf gesehen, wenn der scheinbare Ort entweder des Hauptpunktes oder des Krümmungsmittelpunktes einer spiegelnden Fläche im Schnittpunkte der Achsen liegt. Die Mikroskope können nun teils in unveränderter Stellung zueinander längs der Linie verschoben werden, welche den von ihren Achsen gebildeten Winkel halbiert, teils können dieselben bei unverändertem Schnittpunkte der Achsen gleichzeitig um den gleichen Betrag längs der Achsen verschoben werden. Letzterer Mechanismus dient zum Messen eines Krümmungsradius, ersterer zum Messen des Abstandes zwischen zwei spiegelnden Flächen. Die Dicke der Hornhaut wird demnach dadurch gemessen, daß bei zwei successiven Einstellungen das in der vorderen bzw. hinteren Hornhautfläche entstandene Spiegelbild scharf eingestellt wird. Die Verschiebung des Instrumentes ist dann gleich der scheinbaren Dicke, die wirkliche wird ohne Anwendung approximativ gültiger Formeln durch exakte Berechnung ermittelt. An zehn Augen fand Blix die Dicke zwischen 0,482 und 0,668 mm variierend. Wenn das Auge, in welchem diese extremen Werte vorkamen, ausgeschlossen wurde, waren die Grenzen 0,506 und 0,576. Diese Maße entsprachen teils dem durch kleinsten Hornhautradius definierten Scheitel, teils dem ophthalmometrischen Achsenpunkte, teils Punkten, welche 20° nach innen und nach außen von den erstgenannten belegen waren.

Daß Blix ohne Schwierigkeit das in der hinteren Hornhautfläche entstehende Spiegelbild beobachten und zur Messung der Hornhautdicke verwerten konnte, während sich doch Helmholtz[1] vergebens große Mühe damit gegeben hatte, dasselbe zu entdecken, beruht auf der starken Vergrößerung im Mikroskop, ohne welche das Bild von dem lichtstärkeren der vorderen Fläche nicht getrennt gesehen werden kann. Mit der jetzigen Entwicklung der Beleuchtungstechnik bietet es gar keine Schwierigkeiten, die Spiegelbilder von der hinteren Hornhautfläche in solcher Güte zu erhalten, daß die Dicke der Hornhaut nach derselben Methode wie die der Linse bestimmt werden kann. Um möglichst scharfe und helle Spiegelbilder zu erhalten, hat man eine Lichtquelle mit möglichst großer spezifischer Helligkeit zu benutzen. Wegen der erforderlichen Verschieblichkeit derselben kann nur das glühende Stäbchen der Nernstlampe in Betracht kommen, da Sonnenlicht und elektrisches Bogenlicht ausgeschlossen sein dürften und alle anderen Lichtquellen eine viel geringere spezifische Helligkeit haben. Die Lampe soll in dem einen Ende einer geschlossenen Röhre angebracht werden, deren anderes Ende einen regulierbaren Spalt trägt, und in deren Mitte ein nach Bedarf dezentrierbares Linsensystem sich befindet, welches ein scharfes Bild des glühenden Stäbchens auf die Rückseite der Spaltvorrichtung wirft. Die scharfe Einstellung wird bei weit geöffnetem Spalte unter dem Schutze eines dunklen Glases durch parallaktische Verschiebungen des Auges kontrolliert. Durch Drehen und Verschieben der Lampe sowie durch Dezentration des Linsensystems in einer zur Spaltrichtung senkrechten Richtung kann man es ohne Schwierigkeit dahin bringen, daß das Bild des glühenden Stäbchens genau in der Mitte der Spaltöffnung fokusiert ist. Der Spaltmechanismus muß ein sogenannter bilateraler sein, in welchem sich beide Schneiden gleichzeitig bewegen, die ganze Röhre wird um die Achse drehbar an einem Stativ befestigt. Diese Lichtquelle stellt eine leuchtende Linie von variabler

[1] Über die Akkommodation des Auges. Arch. f. Ophth. I, 2. 1855. S. 1.

Intensität dar, welche durch ihre spezifische Helligkeit allen anderen zur Ophthalmometrie bequem verwendbaren Lichtquellen weit überlegen ist. Der Kürze halber nenne ich dieselbe im folgenden die ophthalmometrische Nernstlampe.

Zur Bestimmung der Hornhautdicke nach der S. 91 von Helmholtz angegebenen Methode habe ich zwei solche Lampen mit vertikal gestellten Spalten genau übereinander derart angebracht, daß die durch den Hornhautscheitel gelegte Horizontalebene den Mittelpunkt zwischen beiden Spalten traf. Mit einem guten 20 mal vergrößernden Fernrohre sind bei geeigneter Lichtstärke die Spiegelbilder auch an der dünnsten Stelle außerordentlich deutlich, sobald der Einfallswinkel ungefähr 25^0 beträgt. Als die Lichtquelle, deren in der Hornhautvorderfläche entstandenes Spiegelbild mit dem in der hinteren Fläche entstehenden Spiegelbilde der ophthalmometrischen Nernstlampe kollimiert werden soll, diente ein kleines Glühlämpchen mit geradem, vertikal gerichtetem Faden. Die Winkel wurden mit einem theodolithähnlichen, oberhalb dem Kopfe des zu untersuchenden befestigten Instrumente abgelesen, dessen vertikale Achse unten in eine Spitze auslief. Die genaue Orientierung des Hornhautscheitels in der Verlängerung dieser Achse wurde in den beiden Stellungen des um eine horizontale Achse drehbaren Fernrohres durch Einstellung desselben auf diese Spitze und auf das Hornhautspiegelbild kontrolliert.

Bei einer vertikalen Winkeldistanz der beiden Spaltmittelpunkte von 12^0 ist die Untersuchung leicht auszuführen und das angewendete Hornhautelement hinreichend klein, um das fiktive Spiegelbild der vertikalen Linie, deren Endpunkte von den Spalten bestimmt sind, als eine Gerade betrachten zu können. Ophthalmometrische Nernstlampen und Fernrohr wurden in einer Winkeldistanz von je 25^0 von der Nullstellung des Theodolithfernrohres angebracht, und es wurde zuerst durch Vorversuche diejenige Blickrichtung ermittelt, bei welcher der Einfallswinkel, nachdem Lampe und Fernrohr Platz gewechselt hatten, approximativ unverändert blieb, eine Stellung, bei welcher die optische Achse des Auges wenig von der Nullstellung des Theodolithfernrohres abweicht. Den Berechnungen wurden dann die Mittelwerte der an verschiedenen Tagen in beiden Stellungen wiederholten Messungen zugrunde gelegt. Bei dieser Anordnung wird das Spiegelbild der hinteren Fläche im Schnittpunkte derselben mit der Normale der Vorderfläche gesehen, und die Berechnung gestaltet sich sehr einfach. Da diese Normale beiden Flächen gemeinsam ist, so stellt sie die Zentrierungsachse der Hornhaut dar, und da dieselbe mit der Nullstellung des Theodolithfernrohres zusammenfällt, so ist das Messungsergebnis die Winkeldistanz ω des Glühlämpchens von derselben, und der Einfallswinkel i ist gleich $\frac{1}{2}(25^0 + \omega)$. Der Strahlengang ist derselbe wie in der Fig. 127, wo man nur die Pupille durch die hintere Hornhautfläche zu ersetzen hat. Zunächst wird der Brechungswinkel i' berechnet, wonach die Gleichungen

$$25^0 - i = u' - i' \qquad \sin u' : \sin i' = \varrho : (\varrho - d)$$

den Winkel u', den der in der vorderen Fläche gebrochene Strahl mit der Zentrierungsachse bildet und die Dicke d bei bekanntem Radius ϱ der vorderen Fläche ergeben. In zwei mit möglichster Sorgfalt untersuchten Augen verschiedener Individuen habe ich die Werte 0,46 und 0,51 erhalten, wodurch die Resultate von Blix auf das genaueste bestätigt werden. Nachdem Blix das

Spiegelbild der hinteren Hornhautfläche gesehen hatte, konnte TSCHERNING[1] dasselbe mit kleinen Glühlämpchen in Erscheinung bringen. Er versuchte auch in einem Falle die Dicke der Hornhaut zu messen. Sein Resultat, 1,15 mm dürfte den Mängeln der weiter unten zu würdigenden Methode und der geringen spezifischen Helligkeit dieser Lichtquelle zuzuschreiben sein. Nach den Messungen am lebenden Auge kann man also mit BLIX den schematischen Wert der Dicke der Hornhaut in der optischen Zone auf rund 0,5 mm veranschlagen.

Die Messungen an toten Augen haben sehr abweichende Resultate ergeben, indem für den Scheitel die Angaben zwischen 0,4 und 1,0 schwanken[2], ja sogar diesen Wert übersteigen. Zum Teil mag dies auf einer postmortalen Quellung beruhen, zum Teil auch auf der Messungsmethode. Ich habe in einigen Fällen die gesunde Hornhaut eines frisch enukleierten Auges in toto abgetragen und die dünnste Stelle mit der gewöhnlichen zu Dickenmessungen verwendeten Mikrometerschraube gemessen, deren Kontaktflächen auf einen Durchmesser von $^1/_2$ mm reduziert waren, und dabei Werte zwischen 0,4 und 0.6 mm erhalten.

Der Radius der hinteren Fläche läßt sich unter Anwendung der oben beschriebenen Versuchsanordnung auf dieselbe Weise wie die Radien der Linsenflächen messen, wohingegen eine direkte Messung mit dem Ophthalmometer nicht gelingt. Mit dem mir zur Verfügung stehenden HELMHOLTZschen Instrumente kann ich überhaupt die Spiegelbilder der hinteren Hornhautfläche nicht sehen, indem dieselben durch die an den Kanten der Platten unregelmäßig gebrochenen Strahlen verdeckt werden. Die Spalte werden horizontal gestellt, und die Spiegelbilder von zwei Glühlämpchen mit geradem horizontalen Faden werden so eingestellt, daß je ein Spiegelbild die Verlängerung eines der in der hinteren Hornhautfläche entstandenen, von den ophthalmometrischen Nernstlampen herrührenden Spiegelbilder bildet. Das vom vertikalen Abstande der beiden Glühlämpchen repräsentierte Objekt gibt dann in der vorderen Hornhautfläche ein Spiegelbild, welches dem in der hinteren Fläche entstandenen, dem vertikalen Abstand der beiden Spalte entsprechenden, gleich ist. Das Fixationszeichen wird wie bei der Messung der Dicke so gestellt, daß die Zentrierungsachse der Hornhaut mit der Nullstellung des Theodolithfernrohres zusammenfällt, und es werden Beobachtungsfernrohr und Nernstlampen in gleicher Winkeldistanz aufgestellt. Gemessen wird die Größe und Entfernung der beiden Objekte sowie ihre Winkeldistanz von der Zentrierungsachse, welche für Nernst- bzw. Glühlampen mit $b\,a\,u$ bzw. $b_0\,a_0\,u_0$ bezeichnet werden mögen. Da der Einfallswinkel bei der Spiegelung in der vorderen Hornhautfläche u bzw. $\frac{1}{2}(u + u_0)$ ist, so erhält man aus der Messung das Verhältnis ε der beiden Spiegelbilder $\beta\,\beta_0$ durch die Beziehung

$$\frac{\beta_0}{\beta} = \frac{a b_0 \cos u}{a_0 b \cos \frac{1}{2}(u + u_0)},$$

welche sich aus der allgemeingültigen Formel $K = \frac{L}{D}$ für die zweite Abbildung ergibt, wenn die Abstände der Objekte vom Brennpunkte des Hornhautspiegels gerechnet werden. Die beiden von dem Nernstlampenobjekte entstandenen

[1] *Optique physiologique.* Paris 1898.

[2] MERKEL im Handb. d. ges. Augenheilk. v. GRAEFE u. SÄMISCH. I. Leipzig 1874. S. 44—45.

Spiegelbilder verhalten sich aber umgekehrt wie die Brechkraft der betreffenden spiegelnden Systeme, indem bei der erreichbaren Genauigkeit der Wert von L bei beiden Spiegelungen gleichgesetzt werden kann. Die Brechkraft der Hornhautvorderfläche in bezug auf die zweite Abbildung bei der Spiegelung ist, wenn ϱ_1 den vertikalen Radius derselben darstellt,

$$-\frac{2\cos u}{\varrho_1},$$

während das spiegelnde System, welches das in der hinteren Hornhautfläche entstandene Spiegelbild liefert, die aus der Formel S. 246 hervorgehende Brechkraft

$$2D_1(1-\delta_1 D_1)+D_2(1-\delta_1 D_1)^2$$

hat. Hier ist D_1 die Brechkraft der vorderen Hornhautfläche in bezug auf die zweite Abbildung, D_2 die der hinteren in bezug auf die zweite Abbildung bei der Spiegelung. Wenn ϱ_2 den vertikalen Radius der hinteren Hornhautfläche, n den Brechungsindex der Hornhautsubstanz darstellt, ist somit

$$D_1=\frac{n\cos i'-\cos i}{\varrho_1} \qquad D_2=-\frac{2n\cos u'}{\varrho_2}$$

zu setzen, indem die Winkel auf dieselbe Weise bezeichnet werden wie oben bei der Ermittelung der Dicke.

Wenn in der Fig. 127 P den Inzidenzpunkt in der hinteren Hornhautfläche darstellt, so ist P' der erste Hauptpunkt des Systems in bezug auf die zweite Abbildung bei der Spiegelung, und ist δ_1 der reduzierte Abstand des erstgenannten Punktes vom Inzidenzpunkte in der vorderen Hornhautfläche, während H den Abstand des ersten Hauptpunktes von demselben darstellt. Aus der Formel S. 246 ergibt sich

$$1-\delta_1 D_1=\frac{\delta_1}{H}$$

und da, wie aus der Fig. 127 ersichtlich,

$$n\delta_1 : H=\sin u:\sin u'$$

ist, so hat man

$$1-\delta_1 D_1=\frac{\sin u}{n\sin u'}$$

und ergibt sich, wenn ε das Verhältnis der beiden von den Nernstlampen herrührenden Spiegelbilder angibt,

$$\varepsilon=-\frac{2\cos u}{\varrho_1}:\frac{2\sin u}{n\sin u'}\left\{\frac{n\cos i'-\cos i}{\varrho_1}-\frac{\sin u}{\varrho_2\operatorname{tg} u'}\right\}.$$

Die resultierende Formel

$$\frac{\varrho_1}{\varrho_2}=\frac{\operatorname{tg} u'(n\cos i'-\cos i)}{\sin u}+\frac{n\sin u'\operatorname{tg} u'}{\varepsilon\sin u\operatorname{tg} u},$$

in welcher ε gleich dem durch die Messung bekannten Wert $\frac{\beta_0}{\beta}$ ist, hat mir in den beiden oben erwähnten Fällen die Werte 1,1822 bzw. 1,1811 geliefert. Unter der Annahme, daß das Verhältnis der horizontalen Radien der vorderen und hinteren Fläche dasselbe ist, würden diese Werte beim schematischen Radius 7,8 mm der Vorderfläche einen Radius der hinteren von 6,6 mm angeben.

Ich habe diese Untersuchungen mit den Spiegelbildern der hinteren Fläche auch bei Einfallswinkeln bis 40° vorgenommen, wobei die Beobachtung leichter ist. Durch einige Übung gelingt es aber bei dem angegebenen Winkel $u = 25°$ hinreichend sicher zu beobachten. Die kleineren Winkel sind deshalb vorzuziehen, weil die Asymmetrienwerte, welche die Unähnlichkeit von Objekt und Bild bedingen, mit zunehmenden Einfallswinkeln wachsen, so daß die Berechtigung der Anwendung der Abbildungsgesetze erster Ordnung Einbuße leidet, obwohl die Formel für jede beliebige Größe des Einfallswinkels exakt ist. Nach hinreichender Adaptation in dem nur durch die ophthalmometrischen Nernstlampen beleuchteten Zimmer sieht man die Spiegelbilder augenblicklich, sobald das Fernrohrobjektiv fixiert wird, und man tut gut, jedesmal, wenn dieselben undeutlich werden, den Blick in diese Stellung zu bringen und dann langsam zum Fixationszeichen wandern zu lassen. Die Kontrolle der richtigen Stellung der Glühlämpchen wird am besten nach momentaner Abbrechung des Stromes im Zündungsaugenblick bewerkstelligt.

Bei der zeitraubenden Arbeit mit der Aufsuchung der Zentrierungsachse, den Messungen und der Rechnung war es mir nicht möglich mehr als diese zwei Fälle vollständig zu untersuchen. Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse in beiden Fällen sowohl unter sich als, was die Dicke betrifft, mit den exakten Untersuchungen von Blix, und was den Radius der hinteren Fläche betrifft, mit der letzten Angabe, 6,5 mm, von Tscherning[1], dürfte auch für die Hinlänglichkeit derselben sprechen. Bei dem Widerspruche, welcher zwischen einer zu kleinen schematischen Hornhautrefraktion und den Ergebnissen anatomischer Untersuchungen über die Länge des Bulbus besteht, und welcher weiter unten des näheren berücksichtigt werden soll, waren aber weitere Untersuchungen wünschenswert und habe ich deshalb noch vier Augen verschiedener Individuen nach einer approximativen Methode untersucht, indem ich eine den Winkel von 6° mit der Visierlinie bildende Linie als Zentrierungsachse angenommen und in der Rechnung die Winkelwerte eingesetzt habe, welche sich bei der 0,46 mm dicken Hornhaut herausgestellt hatten. Da eine Diskussion der Formeln lehrt, daß einem gegebenen Werte von ε um so höhere Werte von $\frac{\varrho_1}{\varrho_2}$ entsprechen, je dicker die Hornhaut ist, so kann der nach dieser approximativen Methode erhaltene Wert des hinteren Hornhautradius nicht zu klein sein. Ich erhielt auf diese Weise für $\frac{\varrho_1}{\varrho_2}$ die Werte 1,1864, 1,1734, 1,1486, 1,1427, welche beim schematischen Radius 7,8 mm der Vorderfläche für den Radius der hinteren Fläche Werte zwischen 6,57 und 6,83 mm geben. Der ophthalmometrische Mittelwert des hinteren Radius der optischen Zone der Hornhaut dürfte somit nicht größer als 6,7 mm sein können, welchen Wert ich auch annehme.

Die ophthalmometrischen Mittelwerte der Krümmungsradien der optischen Zone können aber nicht ohne weiteres zur *Berechnung des Strahlenganges* in bezug auf die Abbildungsgesetze erster Ordnung angewendet werden. Bei dieser Berechnung handelt es sich um die Krümmungsradien in den Schnittpunkten mit der Visierlinie, welche temporalwärts vom ophthalmometrischen Achsenpunkte liegen. Der Radius der Vorderfläche muß in diesem Punkte

[1] Lagrange et Valude, *Encyclopédie française d'ophthalmologie.* III. S. 109. Paris 1904.

etwas kleiner sein als der ophthalmometrische Mittelwert für die ganze Zone — um so mehr, da dieser Wert durch Messungen bestimmt worden ist, bei welchen der eine zur Spiegelung angewendete Hornhautpunkt schon an der Grenze der optischen Zone liegt, und deshalb wahrscheinlich etwas zu groß ausgefallen ist. Auf der anderen Seite kann das Verhältnis $\frac{\varrho_1}{\varrho_2}$ wegen der im Vertikalschnitte stärkeren Abflachung der vorderen Fläche hier etwas größer sein als im Horizontalschnitte, und muß außerdem größer ausfallen, wenn die Messung nicht exakt in der Zentrierungsachse geschah. Es muß deshalb für die Berechnung des Strahlenganges ein etwas kleinerer Radius der vorderen, ein etwas größerer Radius der hinteren Fläche angewendet werden als die schematischen Werte der optischen Zone angeben. Da der Unterschied im Schnittpunkte der Visierlinie und im Scheitelpunkte der optischen Zone nicht berechnet werden kann, so bleibt nichts anderes übrig als bei der Berechnung des Strahlenganges die Krümmungen in diesen beiden Punkten zu identifizieren. Aus den angeführten Gründen nehme ich für die bei dieser Berechnung anzuwendenden schematischen Werte der Krümmungsradien der Hornhaut im Scheitelpunkte der optischen Zone 7,7 bzw. 6,8 mm an.

Zur Kenntnis des Hornhautsystems braucht man den Brechungsindex des Kammerwassers. Der von HELMHOLTZ S. 87 angegebene Wert ist bisher ziemlich allgemein acceptiert, und die zahlreichen refraktometrischen Untersuchungen, deren Resultate nunmehr vorliegen (zusammengestellt bei FREYTAG[1]), zeigen kaum größere Abweichungen von demselben, als die Werte betreffs des destillierten Wassers variieren. Obwohl nun die späteren Untersuchungen eher niedrigere Werte zu geben scheinen, dürfte doch vorläufig kein hinreichender Grund vorliegen, um den schematischen Wert von HELMHOLTZ auf andere Weise zu ändern, als daß bei der Unzuverlässigkeit der vierten Dezimale, diese weggelassen wird. Auch der Index des Glaskörpers, welcher neuerdings um ein paar Einheiten der vierten Dezimale niedriger als der des Kammerwassers gefunden wurde, kann immer noch mit hinreichender Genauigkeit als mit diesem übereinstimmend angesehen werden. Für beide Indizes nehme ich also den schematischen Wert 1,336 an.

Die Konstanten des Hornhautsystems. Wenn Radien und Dicke, in Meter gemessen, mit $\varrho_1\ \varrho_2\ d$, Brechungsindizes von Hornhaut bzw. Kammerwasser mit $n_1\ n_2$ bezeichnet werden, so ergeben die allgemeingültigen Formeln für die Zusammensetzung zweier Systeme

$$D_h = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2 \qquad H_h = \frac{\delta D_2}{D_h} \qquad H_h' = -\frac{\delta D_1}{D_h},$$

in welchen

$$D_1 = \frac{n_1 - 1}{\varrho_1} \qquad D_2 = \frac{n_2 - n_1}{\varrho_2} \qquad \delta = \frac{d}{n_1}$$

zu setzen ist:

Brechkraft D_h	=	43,053 Dioptrien
Ort des ersten Hauptpunktes $1000\,H_h$ . . .	= −	0,0496 mm
Ort des zweiten Hauptpunktes $1000\,(d + n_2 H_h')$	= −	0,0506 mm,

[1] G. FREYTAG, Vergleichende Untersuchungen über die Brechungsindizes der Linse und der flüssigen Augenmedien des Menschen und höherer Tiere in verschiedenen Lebensaltern. Wiesbaden 1907.

wobei der Scheitelpunkt der vorderen Hornhautfläche als den Ort Null habend angesehen wird. Die Brennweiten betragen 23,227 bzw. 31,031 mm.

2. Die Linse.

Den *Ort der Linsenflächen* bestimmt man heute noch — wenn man nicht über ein BLIXsches Ophthalmometer verfügt — am besten nach den von HELMHOLTZ angegebenen Methoden. Man kann dabei Lichtquellen und Fixationsmarke an einer geraden Skale verschieblich anbringen (HELMHOLTZ[1]) oder man befestigt dieselben an einem Gradbogen (TSCHERNING[2]) oder aber man wendet die oben bei der Untersuchung der hinteren Hornhautfläche angegebene Winkelablesung an. Letztere Anordnung hat den Vorzug, daß die ophthalmometrischen Nernstlampen, deren Anbringung als verschieblich an Skala oder Gradbogen auf Schwierigkeiten stößt, dabei zur Verwendung kommen können. (TSCHERNING hat seiner betreffenden Anordnung den Namen „Ophthalmophakometer“ gegeben.)

Zur Messung der Tiefe der vorderen Kammer wurde von DONDERS[3] ein sogenanntes Kornealmikroskop angewendet, mit welchem zuerst auf die eventuell durch Kalomel sichtbar gemachte vordere Hornhautfläche, dann auf den Pupillenrand eingestellt wird, wonach durch die Verschiebung der scheinbare Ort der Pupille gegeben ist. Zuverlässigere Resultate dürfte die unter HELMHOLTZ' Leitung ausgearbeitete Methode von MANDELSTAM und SCHÖLER[4] geben, welche von REICH[5] angewendet wurde. Zwischen Mikroskop und Hornhaut befindet sich eine unbelegte spiegelnde Glasplatte, durch welche Licht in der Richtung der Achse des Mikroskops in das Auge geworfen wird. Das von der Lichtquelle herrührende Spiegelbild in der vorderen Hornhautfläche wird durch optische Mittel verschoben, bis es gleichzeitig mit dem Pupillenrande scharf eingestellt werden kann. Der berechnete Ort des Spiegelbildes ist dann der scheinbare Ort der Pupille. Bei diesen Methoden wird wie bei der HELMHOLTZschen der Abstand des Irisrandes von der vorderen Hornhautfläche gemessen.

Die oben beschriebene Methode von BLIX, welche sich den letztgenannten gewissermaßen anschließt, dürfte die bisher sicherste sein, und ergibt den Abstand der vorderen Linsenfläche. Diesen Abstand erhält man auch mit der von HELMHOLTZ benutzten Methode zur Messung des Abstandes der hinteren Linsenfläche, welche überhaupt den scheinbaren Ort einer spiegelnden Fläche ergibt. Es ist aber zu beachten, daß, während diese Methode wegen der geringen Dicke der Hornhaut bei der Messung dieser Dicke vollkommen exakte Resultate gibt, dasselbe nicht bei der Bestimmung des Ortes der Linsenflächen der Fall ist, da der Abstand der Punkte, in welchen das Licht beim Einfallen bzw. beim Austritte die Hornhaut trifft, zu groß ist, um das zwischenliegende Stück als sphärisch ansehen zu können. Bei diesen Messungen dürfte es also notwendig sein, unter Zugrundelegung der in diesen Punkten und im Schnittpunkte der

---

[1] Dieses Handbuch. 2. Aufl. S. 103.

[2] a. a. O.

[3] *Instrument pour mesurer la profondeur de la chambre antérieure et la courbure de la cornée. Congrès de Londres. Compte rendu.* 1872. S. 209.

[4] L. MANDELSTAM und H. SCHÖLER, Eine neue Methode zur Bestimmung der optischen Konstanten des Auges. Arch. f. Ophth. XVIII, 1. 1872. S. 155.

[5] M. REICH, Resultate einiger ophthalmometrischer und mikrooptometrischer Messungen. Ebenda. XX, 1. 1874. S. 207.

Hornhaut mit der bei der Messung angewendeten Achse gemessenen Radien eine Schmiegungsellipse zu berechnen und bei der trigonometrischen Ermittelung des Ortes der betreffenden Fläche anzuwenden. Dagegen sind die Fehler, welche dadurch entstehen, daß von der Brechung in der hinteren Hornhautfläche abgesehen wird, von ganz untergeordneter Bedeutung. Nach TSCHERNING wird die Achse bei diesen Messungen derart bestimmt, daß die in der Hornhaut und in der betreffenden Linsenfläche entstandenen Spiegelbilder zweier, in einer die Fernrohrachse enthaltenden Ebene belegener Lichtquellen scheinbar in einer geraden Linie liegen sollen. Bei der Berechnung wird die Hornhaut als sphärisch angesehen, und die von HELMHOLTZ angegebene Vorsichtsmaßregel, welche in der Erneuerung der Untersuchung nach Wechsel der Einfallsrichtung ohne Veränderung der Winkel besteht, scheint nicht beobachtet zu werden. Von dieser Methode dürfte deshalb gesagt werden müssen, daß sie zwar eine wesentliche Vereinfachung der Untersuchung darbietet, daß aber die Zuverlässigkeit der Resultate darunter leidet.

Zur Untersuchung der Tiefe der vorderen Kammer gibt es noch zwei, hauptsächlich für den klinischen Gebrauch bestimmte Methoden, nämlich die von HEGG[1] mit einem stereoskopischen Instrumente und wandernder Marke und die von GRÖNHOLM[2] mit dem Orthoskope von CZERMAK, von welchen letztere nur der Ermittelung approximativer Werte dient.

Die durch die ursprüngliche HELMHOLTZsche Methode erhaltenen Werte des Abstandes der Pupillarebene von dem Hornhautscheitel sind

HELMHOLTZ[3]	4,024	3,597	3,739	
KNAPP[4]	3,692	3,707	3,477	3,579
ADAMUK und WOINOW[5] .	3,998	3,237	2,900	3,633,

während v. REUSS[6] durchweg kleinere Zahlen gefunden hat, welche offenbar nicht mit den obenstehenden zusammen verwertet werden können. Diese geben den Mittelwert 3,598. Die Methode von MANDELSTAM und SCHÖLER hat in zwei Fällen die Werte 3,921 bzw. 3,651 gegeben, während REICH für drei Personen 3,639, 3,708, 3,652 fand, so daß die Methode den Mittelwert 3,714 mm ergeben hat. Die von BLIX untersuchten emmetropischen Augen zeigten einen Mittelwert von 3,515, wobei aber zu beachten ist, daß von den fünf Augen nur eines im Hornhautscheitel gemessen wurde, die übrigen dagegen im Schnittpunkte der Hornhaut mit der Visierlinie, so daß der wahre Mittelwert etwas größer sein muß, und sich wahrscheinlich dem mit der HELMHOLTZschen Methode gefundenen nähert.

---

[1] E. HEGG, Eine neue Methode zur Messung der Tiefe der vorderen Augenkammer. Arch. f. Augenheilkunde. XLIV. Erg.-Heft. 1901. S. 84.

[2] V. GRÖNHOLM, Eine einfache Methode die Tiefe der vorderen Augenkammer zu messen. Skand. Arch. f. Physiologie. XIV. 1903. S. 235.

[3] S. 18 ff.

[4] J. H. KNAPP, Über die Lage und Krümmung der Oberflächen der menschlichen Kristallinse und den Einfluß ihrer Veränderungen bei der Akkommodation auf die Dioptrik des Auges. Arch. f. Ophth. VI, 2. 1860. S. 1.

[5] E. ADAMÜK und M. WOINOW, Zur Frage über die Akkommodation der Presbyopen. Ebenda. XVI, 1. 1870. S. 144.

[6] A. v. REUSS, Untersuchungen über die optischen Konstanten ametropischer Augen. Ebenda. XXIII, 4. 1877. S. 183.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen leiten zu der Annahme des schematischen Wertes 3,6 mm für den Abstand der vorderen Linsenfläche von der Hornhautvorderfläche. Derselbe wurde von HELMHOLTZ[1] seinem schematischen Auge zugrunde gelegt und ist ziemlich allgemein acceptiert worden. Die von STADFELDT[2] und AWERBACH[3] mit der approximativen TSCHERNINGschen Methode gefundenen Mittelwerte sind 3,81 (10 Augen) bzw. bei Emmetropie 3,4 (15 Augen), bei Hypermetropie 3,5 (28 Augen), bei Myopie 3,6 (43 Augen).

Die Bestimmung des Ortes der hinteren Linsenfläche ergibt die Dicke der Linse. Die Resultate der unter HELMHOLTZ' Leitung ausgeführten Untersuchungen sind:

HELMHOLTZ[4]	3,414	3,801	3,555	
KNAPP	3,920	3,848	3,776	3,622
ADAMÜK und WOINOW .	3,202	3,963	3,944	3,567

und ergeben den Mittelwert 3,692 mm. Die Werte von MANDELSTAM und SCHÖLER ergeben zusammen mit denen von REICH den Mittelwert 3,787 mm, STADFELDT fand im Mittel 3,63, AWERBACH 3,89, 3,94, 3,88 mm bei bzw. Emmetropie, Hypermetropie, Myopie.

HELMHOLTZ nahm für sein schematisches Auge den Wert 3,6 mm an. Aus den obenstehenden Zahlen ergibt sich nun, daß wenn die Untersuchungsmethoden vollkommen exakt wären, das Erhöhen dieses Wertes um 0,1 bis 0,2 mm berechtigt wäre. Zieht man aber die Fehlerquellen in Betracht, welche von der asymmetrischen Abflachung der Hornhaut, der unbekannten Form der vorderen Linsenfläche und dem Anwenden eines Totalindex der Linse herrühren, so dürfte es keinem Zweifel unterliegen, daß dieser Betrag innerhalb der Grenzen der Fehlerquellen liegt. Da nun die Linse während des ganzen Lebens wächst, wobei die an der toten Linse gemessene Dicke nach den bisherigen Untersuchungen zu urteilen zunimmt, jedenfalls aber nicht abnimmt, da der Unterschied der Dicke der im Auge befindlichen nicht akkommodierenden Linse von der toten Linse mit dem Alter abnimmt und da endlich der schematische Wert wegen der große individuelle Unterschiede darbietenden, schon bald nach dem jugendlichen Alter wahrnehmbaren Veränderungen der Linsensubstanz, einem jugendlichen Auge entsprechen soll, so muß derselbe etwas niedriger als der Mittelwert gewählt werden, und ich komme zu dem Schluß, daß in dem vorliegenden Untersuchungsmateriale hinreichende Gründe nicht enthalten sind, um den von HELMHOLTZ angenommenen schematischen Wert der Dicke der nicht akkommodierenden Linse, 3,6 mm, zu ändern.

Krümmung der Linsenflächen. Dasselbe gilt auch von den Krümmungsradien der beiden Linsenflächen. Die Unterschiede der betreffenden Mittelwerte von den von HELMHOLTZ angenommenen schematischen Werten fallen innerhalb der Grenze der durch die Methoden bedingten Fehlerquellen. Es dürfte deshalb überflüssig sein, die Zahlen hier anzuführen, es genügt zu erwähnen, daß auch

---

[1] Dieses Handbuch 2. Aufl.

[2] A. STADFELDT, Den menneskelige linses optiske konstanter. Kopenhagen 1898.

[3] M. AWERBACH, Zur Dioptrik der Augen bei verschiedenen Refraktionen. (Russisch.) Inaug.-Diss. Moskau 1900. Ref. im Jahresber. ü. d. Leist. u. Fortschr. i. G. d. Ophthalmologie. XXXI. S. 652.

[4] S. 91.

die nach Tscherning's Methode ausgeführten Untersuchungen ähnliche Resultate gegeben haben, indem Stadfeldt die Mittelwerte 10,9 und 6,0 mm, Awerbach 10,4 und 6,1 mm angibt. Die schematischen Werte der Krümmungsradien der Linsenflächen 10 bzw. 6 mm, welche von Helmholtz angewendet wurden, dürften demnach immer noch die besten sein.

Zur Messung der Krümmung der Linsenflächen wurde bei den älteren Untersuchungen teils die ursprüngliche Methode von Helmholtz angewendet, teils wurden auch die unter Anwendung von Sonnenlicht[1] oder Drummondschem Kalklicht[2] erhaltenen Spiegelbilder direkt mit dem Ophthalmometer von Helmholtz gemessen. Zur letzteren Methode eignen sich vorzüglich die ophthalmometrischen Nernstlampen. Für eine genaue Berechnung des Radius aus dem Messungsresultate hat man die oben bei der Ermittelung der Krümmung der hinteren Fläche der Hornhaut angegebene Methode zu befolgen. Einen approximativen Wert erhält man unter Anwendung der von Helmholtz[3] angegebenen Formel, welche für unendlich kleine Inzidenzwinkel gültig ist. Die Untersuchungen, die ich auf erstgenannte Weise ausgeführt habe, geben ebensowenig wie die Untersuchungen anderer Anlaß zu einer Änderung der schematischen Werte der Abstände oder Krümmungen der Linsenflächen.

Eigentümlich sind die im Laboratorium von Tscherning angestellten Messungen von Saunte.[4] In einer ziemlich komplizierten Versuchsanordnung kam diffuses, durch eine elektrische Bogenlampe erhaltenes Licht zur Verwendung. Da einfallendes Licht und Ophthalmometerachse auf dieselbe Weise, wie oben bei der Messung der hinteren Hornhautfläche beschrieben wurde, einen Winkel miteinander bildeten, nannte er seine Methode eine „dezentrierte Ophthalmometrie“. Trotz der schiefen Inzidenz sind aber bei der Rechnung Formeln angewendet worden, welche nur für senkrechte Inzidenz gelten, so daß die Resultate nicht verwertbar sind.

Die von Stadfeldt und Awerbach benutzte Tscherningsche Methode besteht in der Ermittelung der scheinbaren Lage der Krümmungsmittelpunkte auf eine zur Ermittelung des Ortes der Flächen analoge Weise. Läßt man nämlich, nachdem eine Zentrierungsachse bestimmt worden ist, das Licht in der Richtung der Ophthalmometerachse in das Auge fallen, während die Zentrierungsachse einen endlichen Winkel mit derselben bildet, so kann man nach Bestimmung des Einfallswinkels den Ort des Krümmungsmittelpunktes durch trigonometrische Rechnung finden. Da aber ziemlich große Winkel nötig sind, und die Flächen bei der Rechnung als sphärisch angesehen werden, so können auf diese Weise nur approximative Werte erhalten werden, deren Fehler sich der Berechnung entziehen. Tscherning hat selbst darauf aufmerksam gemacht, daß die Messungsresultate an Zuverlässigkeit zu wünschen übrig lassen, indem er die aus der geringen spezifischen Helligkeit der angewendeten Lichtquellen resultierende Unsicherheit hervorgehoben hat. Es dürften deshalb die Unterschiede der Werte von Stadfeldt und Awerbach von den schematischen Werten mit Sicherheit innerhalb der Grenzen der möglichen Fehlerquellen fallen.

---

[1] B. Rosow, Zur Ophthalmometrie. A. d. physiol. Labor. des Herrn Prof. Helmholtz, Arch. f. Ophth. XI, 2. S. 129.

[2] v. Reuss, a. a. O.

[3] Dieses Handbuch, 2. Aufl. S. 144.

[4] O. H. Saunte, Linsemaalinger (Linsenmessungen). Odense 1905.

Die Form der Linsenflächen ist von BESIO[1] im lebenden Auge mit der TSCHERNINGschen Methode näher untersucht worden. Er fand dabei eine so auffallende Abflachung nach der Peripherie, daß dieselbe mit Sicherheit weit außerhalb der Grenze der möglichen Fehler liegt. Dagegen dürften wegen der approximativen Berechnungsmethode die Ergebnisse in quantitativer Hinsicht nicht dieselbe Sicherheit beanspruchen können. Er fand die Form der Schmiegungsfläche zweiten Grades für die vordere Linsenfläche hyperbolisch, für die hintere parabolisch. Die Abflachung nach der Peripherie wurde durch Untersuchungen an der toten Linse unter Beobachtung nötiger Vorsichtsmaßregeln und unter Anwendung exakter Berechnungsmethode von DALÉN[2] konstatiert, während HOLTH[3] betreffs der vorderen Linsenfläche zu entgegengesetztem Resultate gekommen war.

Bei der Untersuchung der in der vorderen Linsenfläche entstehenden Spiegelbilder kann man manchmal beobachten, daß bei kleinen Bewegungen des untersuchten Auges die Spiegelbilder kleine Bewegungen mit auffallend großer Geschwindigkeit ausführen, wie wenn Dellen oder Furchen vorhanden wären. Da aber das gespiegelte Licht, wie aus der diffusen Form der Spiegelbilder hervorgeht, nicht ausschließlich von der vorderen Linsenfläche herrührt, sondern zum Teil auch von den derselben am nächsten liegenden Schichten reflektiert wird, so kann hieraus betreffend die Form der Fläche kein Schluß gezogen werden.

Die Linsensubstanz stellt, wie die refraktometrischen Untersuchungen lehren, ein Medium mit variablem Brechungsindex dar. Die physiologischen Untersuchungen lehren, daß die Variation im kindlichen Alter bis zum Anfang des jugendlichen eine kontinuierliche ist. Gegen Ende der zweiten Lebensdekade, oder meistens etwas später, beginnen aber Lichtreflexe aufzutreten, welche eine Diskontinuität in der Variation des Brechungsindex beweisen. Es sind dies die beim Menschen zuerst von HESS[4] beschriebenen „Kernbildchen", welche sich bei Bewegungen der Lichtquelle so verhalten, als ob sie in einer kontinuierlichen Fläche entständen. Demgemäß ist es, um die Dioptrik der Linse untersuchen zu können, erforderlich, die Gesetze der optischen Abbildung nicht nur in Medien mit kontinuierlich variablem Brechungsindex, sondern auch bei solchen Diskontinuitäten der Indexvariation zu kennen, welche als Trennungsflächen zwischen zwei verschiedenen Medien mit variablem Brechungsindex behandelt werden können. Obwohl zwar unsere Kenntnisse von den Diskontinuitätsflächen[5] nicht ausreichend sind, um die betreffenden Gesetze auf dieselben anzuwenden, sind diese doch bei der durch die Linsenflächen bewirkten Abbildung unumgänglich nötig, indem diese Abbildung beim schiefen Durchgange des Lichts nicht durch die gewöhnlichen Formeln bestimmt wird. Das Problem

---

[1] E. BESIO, *La forme du cristallin humain, Journal de physiologie et de pathologie générale.* III. 1901. S. 547, 761, 783.

[2] ALBIN DALÉN, Ophthalmometrische Messungen an der toten menschlichen Kristallinse. Mitt. a. d. Augenklinik d. Carol. Med. Chir. Inst. z. Stockholm. 1905.

[3] S. HOLTH, *Études ophthalmométriques sur l'oeil humain après la mort.* IX. *Congr. intern. d'ophth. d'Utrecht. Compte rendu.* 1899. S. 386.

[4] C. HESS, Über Linsenbildchen, die durch Spiegelung am Kerne der normalen Linse entstehen. Arch. f. Augenheilk. LI. 1905. S. 375.

[5] Der Begriff der Diskontinuität bezieht sich ausschließlich auf die mathematische Funktion der Indexvariation, nicht aber auf die Ausfüllung des Raumes durch Linsensubstanz.

ist von L. HERMANN[1] und L. MATTHIESSEN[2] in Angriff genommen worden, indem die Differentialgleichungen der Strahlenvereinigung aus den für homogene Medien geltenden Formeln durch einen Limesübergang gewonnen wurden. Diese Methode ist aber nur dann zuverlässig, wenn ein solcher Limesübergang nicht bei der Entwicklung der angewendeten Formeln stattgefunden hat, und in Übereinstimmung hiermit sind die auf diese Weise erhaltenen Differentialgleichungen der Strahlenvereinigung in einem Meridianschnitte und der Aberration falsch. Da die Untersuchungen sich überdies nicht auf die Vergrößerungskoeffizienten erstreckten, so war von den nötigen Gesetzen nur die zuerst von LIPPICH[3] gegebene Differentialgleichung der Strahlenvereinigung längs der Achse eines Umdrehungssystems und die von HERMANN für konzentrisch geschichtete, von MATTHIESSEN für Umdrehungssysteme deduzierte Differentialgleichung der Strahlenvereinigung im Äquatorealschnitte bekannt, wozu noch kommt, daß ein von MATTHIESSEN[4] gefundenes approximatives Gesetz der Indexzunahme in derselben Weise zur Integration verwendet worden war, als ob es mathematisch exakt wäre, und daß hierdurch wiederum falsche Resultate gewonnen worden waren.

Bei der Ermittelung der bezüglichen Gesetze[5] ergibt sich nun, daß die allgemeine Fundamentalgleichung der optischen Abbildung und die aus derselben deduzierten allgemeinen Grundgesetze (S. 233) in beliebigen optischen Systemen auch dann gültig sind, wenn in denselben Medien mit kontinuierlich variablem Brechungsindex vorhanden sind. Die betreffenden Differentialgleichungen nehmen für den Fall einer Symmetrieebene eine einfachere Gestalt an, welche somit für die Meridianebene eines Umdrehungssystems zur Anwendung kommen. Durch Integration ergeben sich für diesen Fall die bei homogenen Medien geltenden Gleichungen

$$\varkappa^2 B = A + \varkappa D \qquad \varkappa K B = A,$$

wo die Brechkraft durch ein der Summenformel entsprechendes definitives Integral erhalten wird. Außer den vollständigen Gesetzen erster Ordnung hat die Untersuchung die Formeln zur Berechnung der Aberration ergeben. Was den in den Linsenflächen stattfindenden Übergang des Lichts zwischen zwei Medien betrifft, von welchen das eine einen variablen Brechungsindex besitzt, so hat die Brechkraft nur bei der zweiten, nicht aber bei der ersten Abbildung denselben Wert wie zwischen zwei homogenen Medien, und die Formel zur Berechnung der Aberration längs der Achse ist auch eine andere.

Die Untersuchung der Strahlenvereinigung im Auge unter Anwendung eines leuchtenden Punktes hat ergeben, daß die Wellenfläche des im Auge gebrochenen Strahlenbündels zwar keine Umdrehungsfläche ist, aber als eine vollständige Berührung vierter Ordnung mit einer solchen habend behandelt werden kann. Die um den leuchtenden Punkt sichtbaren Strahlengebilde werden durch

[1] L. HERMANN, Über Brechung bei schiefer Inzidenz mit besonderer Berücksichtigung des Auges. Arch. f. d. ges. Physiol. XXVII. 1882. S. 291.

[2] L. MATTHIESSEN, Über den schiefen Durchgang unendlich dünner Strahlenbündel durch die Krystallinse des Auges. Ebenda. XXXII. 1883. S. 97.

[3] In einem Referate in Zeitschr. f. Math. u. Phys. XXIII. 1878. Hist.-Lit. Abt. S. 63.

[4] Grundriß der Dioptrik geschichteter Linsensysteme. Leipzig 1877.

[5] A. GULLSTRAND, Die optische Abbildung in heterogenen Medien und die Dioptrik der Kristallinse des Menschen. *K. Sv. Vet. Akad. Handl.* XLIII. 1908. Nr. 2.

eine bestimmte Beschaffenheit der Wellenfläche bedingt, welche durch einen wellenförmigen Verlauf der Schnittlinie derselben mit einem koaxialen Zylinder gekennzeichnet ist. Da das Entstehen dieser Form der Wellenfläche beim Durchgang des Lichts durch die Linse bewiesen ist (S. 164), so müssen mit mathematischer Notwendigkeit entweder die Linsenflächen oder die Isoindizialflächen der Linsensubstanz eine solche Form haben. Letztere Flächen, welche durch Punkte mit einem und demselben Brechungsindex gelegt werden, bilden somit ein System, welches eine vollständige Berührung vierter Ordnung mit einem Umdrehungssystem hat, und es kann nur dieses Umdrehungssystem Gegenstand der Untersuchung sein.

Wenn die Linse als ein Medium mit kontinuierlich variablem Brechungsindex behandelt wird, so ist dies nur betreffs der jugendlichen Linse, welche keine Zeichen einer Diskontinuität darbietet, vollkommen exakt, für die reifere Linse dagegen jedenfalls so exakt, wie es die bisher vorliegenden physiologischen Daten erlauben. Die mathematischen Mittel zur Behandlung der Dioptrik der Diskontinuitätsflächen sind vorrätig.

Die Linsensubstanz stellt ein optisches System dar, welches bei der Untersuchung der Dioptrik der Linse mit den durch die Linsenflächen repräsentierten auf gewöhnliche Weise zusammengesetzt wird, und welches ich nach dem Vorschlage Matthiessens als die Kernlinse bezeichne. Diese ist somit als ein Umdrehungssystem mit kontinuierlich variablem Brechungsindex zu behandeln, und es erübrigt nur, das Gesetz der Indexvariation zu ermitteln, um die vollständige Dioptrik der Linse kennen zu lernen. Da die maximale Indexdifferenz ebenso wie Linsendicke und Pupillendurchmesser im Verhältnis zur Brennweite relativ klein sind, so kann dieses Gesetz in der Form einer Serie dargestellt werden, wofern nur durch refraktometrische Untersuchungen die Konvergenz der Serie bewiesen wird. Wenn man den Punkt, wo der Brechungsindex den maximalen Wert erreicht, als Linsenzentrum bezeichnet und als Nullpunkt eines Koordinatensystems wählt, dessen x-Achse mit der Umdrehungsachse zusammenfällt und in der Richtung nach der Netzhaut zu positiv gerechnet wird, so ist die allgemeine Form der Indizialgleichung unter Mitnahme von Gliedern bis einschließlich der vierten Ordnung, wenn μ_0 den Brechungsindex im Linsenzentrum, μ denjenigen im Punkte xy bezeichnet:

$$\mu_0 - \mu = \frac{1}{2}(m x^2 + n y^2) + \frac{1}{6}(M x^3 + 3 N x y^2) + \frac{1}{24}(p_m x^4 + 6 p_0 x^2 y^2 + p_n y^4)$$

indem die übrigen Koeffizienten in einem Umdrehungssystem gleich Null sind. Werden in dieser Serie nur die beiden ersten Glieder mitgenommen, so ist die Indizialgleichung vom zweiten Grade, und die Indizialkurve, welche entsteht, wenn längs einem Durchmesser der Linse die Abstände vom Zentrum als Abszissen, die Brechungsindizes als Ordinaten eingetragen werden, stellt eine Parabel dar. Matthiessen und seine Nachfolger haben nun durch eine Reihe von Untersuchungen an menschlichen und tierischen Linsen konstatiert, daß die Indizialkurve annähernd eine parabolische Form hat, obwohl die Schmiegungskurve zweiten Grades auch eine Ellipse mit großer Exzentrizität sein kann. Hierdurch ist zur vollen Evidenz bewiesen, daß die Darstellung der Indizialgleichung in der Form einer Serie gestattet ist, indem diese Serie stark konvergiert, sowie daß die Indizialgleichung zweiten Grades eine erste Annäherung darstellt, deren Anwendung innerhalb der Grenzen gestattet ist, wo dieselbe

nicht mit mathematischen oder physikalischen Tatsachen in Widerspruch kommt. Die mathematische Untersuchung lehrt aber, daß solche Widersprüche vorhanden sind. MATTHIESSEN konnte keine einheitliche Indizialgleichung für die Kernlinse aufstellen, sondern mußte jeder Hälfte derselben eine besondere Funktion zuerteilen, wobei die Isoindizialflächen des einen Systems diejenigen des anderen einfach schneiden, obwohl in der schematischen Figur einer Meridianebene[1] die Schnittpunkte willkürlich abgerundet sind. Dies kommt aber einer durch das Linsenzentrum gehenden Diskontinuitätsfläche gleich, welche den Anlaß zu einem Reflexe geben müßte, und deren Existenz auf Grund der absoluten Abwesenheit einer entsprechenden anatomischen Anordnung mit Sicherheit in Abrede gestellt werden kann. An der Hand der Ergebnisse der letzten refraktometrischen Untersuchungen[2] wäre es zwar nunmehr möglich, für eine symmetrische akkommodierende Linse eine einheitliche Indizialgleichung zweiten Grades, für die asymmetrische eine solche dritten Grades aufzustellen. Da dies aber eine so hochgradige Verdickung der Linse bei der Akkommodation bedingen würde, daß sie bestimmt ausgeschlossen werden kann, so zeigt es sich unumgänglich notwendig, bei der Untersuchung der Dioptrik der Kernlinse sämtliche Glieder bis einschließlich der vierten Ordnung in der Indizialgleichung mitzunehmen. Eine andere Indizialgleichung zweiten Grades, welche durch Reihenentwicklung des reziproken Wertes des Brechungsindex erhalten wird, rührt von MAXWELL her, stellt aber wesentlich nichts anderes dar, als ein interessantes geometrisch optisches Problem ohne physiologische Realität. Bei Nichtberücksichtigung von Gliedern höherer Ordnung als der zweiten fällt sie mit der MATTHIESSENschen zusammen.

Die parabolische Indizialkurve MATTHIESSENs, welche auch in der spätesten Untersuchung auf diesem Gebiete, der von MONOYER[1] angewendet wurde, ist ein typisches Analogon zu den STURMschen Brennlinien des allgemeinen Strahlenbündels, indem beide Approximationen durch Weglassen Glieder höherer Ordnung als der zweiten entstanden und außerhalb der Grenzen angewendet worden sind, wo diese Approximation zulässig ist. Der unglückliche Einfluß, den die Brennlinien in der geometrischen Optik ausgeübt haben, findet in dem von MATTHIESSEN gegebenen Gesetze des Totalindex ein vollkommenes Gegenstück. Wie die mathematische Untersuchung lehrt, verändert sich allgemein der Totalindex bei jeder Formveränderung der Linse und kann somit gar nicht aus den Werten des Brechungsindex im Linsenzentrum und in der äußersten Kortikalschicht berechnet werden. MATTHIESSENs Gesetz, daß der Totalindex den Index des Linsenzentrums um ebensoviel übersteigt, wie dieser den Index des äußersten Cortex, wäre zwar richtig, wenn die Indizialflächen mit mathematischer Genauigkeit einander geometrisch ähnliche Flächen zweiten Grades darstellten, und wenn keine anderen Formveränderungen der Linse vorkommen könnten, als daß diese Eigenschaft unverändert beibehalten würde. Daß dieser singuläre Fall bei der menschlichen Linse ausgeschlossen ist, geht aus dem oben Gesagten hervor.

---

[1] a. a. O. Grundriß usw. S. 198.

[2] FREYTAG, a. a. O.

[1] MONOYER, *La théorie des systèmes stratifiés. Société française d'ophthalmologie. Congrès de 1908.* Paris 1908. Die Methode ist eine Variante derjenigen von MATTHIESSEN und ergibt, wie diese, keine einheitliche Indizialgleichung.

Die nächste Aufgabe ist somit, die sieben Konstanten der oben angegebenen Indizialgleichung zu bestimmen. Aus den refraktometrischen Untersuchungen können mit Hinsicht auf die Grenzen der durch die Methoden erzielbaren Genauigkeit nicht mehr als drei Gleichungen zu diesem Zwecke erhalten werden, indem der Index im Linsenzentrum, in den Linsenpolen und am Äquator als mit hinreichender Genauigkeit bekannt angesehen werden kann. Zwei weitere Gleichungen ergeben sich aus den Werten der Krümmungsradien der Linsenflächen, indem mit größter Wahrscheinlichkeit angenommen werden muß, daß die anliegenden Isoindizialflächen dieselben Krümmungen haben. Zu noch einer Gleichung reichen unsere physiologischen Kenntnisse aus, indem die Brechkraft der Kernlinse aus dem Refraktionsverluste des Auges bei der Linsenentfernung berechnet werden kann. Da aber noch eine Gleichung übrig bleibt, als welche das MATTHIESSENsche parabolische Gesetz angewendet werden kann, wenn die Gültigkeit desselben auf die Linsenachse beschränkt wird, und da die Ergebnisse der Untersuchungen, aus welchen dasselbe erhalten wurde, die Annahme desselben überall dort berechtigt machen, wo es nicht mit den Tatsachen in Widerspruch kommt, so habe ich die erforderliche 7. Gleichung dadurch gewonnen, daß ich eine parabolische Indizialkurve längs der Achse angenommen habe, wobei die Konstante p_m gleich Null wird. Dabei habe ich aber durch eine besondere Untersuchung gezeigt, daß eine Abweichung von diesem Gesetze längs der Achse, auch in einem Grade, welcher durch unsere sonstigen Kenntnisse ausgeschlossen ist, keinen wesentlichen Einfluß ausübt. Auf jeden Fall habe ich den Deduktionen eine solche Form gegeben, daß, wenn künftige Untersuchungen einen von Null abweichenden Wert von p_m ergeben sollten, die Konstanten der Indizialgleichung unmittelbar durch Einsetzen dieses Wertes erhalten werden können.

Die Lage des Linsenzentrums kann wegen der langsamen Variation des Brechungsindex in der Nähe desselben nur approximativ bestimmt werden. Mit Hinsicht darauf, daß die ausgiebigere Formveränderung der vorderen Fläche bei der Akkommodation, bei welcher die Linse sich der symmetrischen Form nähert, eine erheblichere Dickenzunahme des vor als des hinter dem Zentrum belegenen Teiles der Linse wahrscheinlich macht, und daß nach eingetretener Sklerosierung des Kernes dieser gewöhnlich etwas näher der vorderen als der hinteren Fläche gefunden wird, habe ich schätzungsweise dem Abstand des Linsenzentrums von der vorderen bzw. hinteren Linsenfläche den Wert 1,7 bzw. 1,9 mm gegeben. Eine Vernachlässigung dieses Unterschiedes wäre aber für die Dioptrik der Linse ohne wesentliche Bedeutung.

Was die Brechungsindizes betrifft, so kann den älteren, vor der Einführung des Refraktometers gemachten Untersuchungen kein Wert beigelegt werden. Die neueren, mit diesem Instrumente ausgeführten Untersuchungen haben Zahlen ergeben, welche sich für äußersten Cortex bzw. Linsenzentrum um 1,38 bis 1,39 bzw. um 1,40 bis 1,42 bewegen. Die ohne jedem Zweifel zuverläßlichsten Resultate stammen von FREYTAG[1], welcher eine große Zahl von Messungen unter sorgfältiger Beachtung nötiger Kautelen ausgeführt hat. Ich lege deshalb seine Zahlen den schematischen Werten zugrunde. Aus seiner Tab. III ergeben sich für menschliche Augen bei einem Alter bis 30 Jahre als Mittelwerte des Index der oberflächlichsten Schicht.

---

[1] a. a. O.

Vorderer Pol	Äquator	Hinterer Pol
1,387	1,375	1,385

und die Tab. IX ergibt für dieselbe Kategorie von Augen den Mittelwert des Index im

Linsenzentrum: 1,406.

Der hierdurch konstatierte Indexunterschied zwischen den Polen einerseits und dem Äquator auf der andern Seite ist von größter Bedeutung für die Dioptrik der Linse, und es ist u. a. eben dieser Unterschied, welcher es nunmehr ermöglicht, eine MATTHIESSENsche Indizialgleichung zweiten Grades für die akkommodierende Linse aufzustellen. Der gefundene Unterschied zwischen den beiden Linsenpolen dürfte nicht dieselbe Bedeutung beanspruchen können, da erstens ein solcher Unterschied nicht merkbar auf die dioptrischen Gleichungen einwirkt, zweitens die Differenz sehr klein ist, und drittens die post mortem eintretende Vertrocknung des Auges einen Flüssigkeitswechsel in demselben bewirkt, welcher das Resultat in dieser Hinsicht weniger sicher macht. Ich nehme deshalb für den Index der beiden Linsenpole den Mittelwert 1,386 als schematischen Wert an. Was den Index am Äquator betrifft, so kann derselbe erst dann in die Rechnung eingeführt werden, wenn der Abstand der betreffenden Schicht vom Linsenzentrum bekannt ist. Da hierüber keine Messungen angestellt worden zu sein scheinen, verwende ich das Resultat derart, daß ich den schematischen Index 1,376 dem Punkte $x = 0$, $y = \pm 4{,}2$ zuerteile, wobei der obenstehende Mittelwert einem etwas peripherer liegenden schätzungsweise mit dem Äquator zusammenfallenden Punkte angehört.

Die Brechkraft der Kernlinse bzw. der Totalindex der Linse würde sich aus den so bestimmten schematischen Werten ergeben, wenn das von MATTHIESSEN aufgestellte Gesetz des Totalindex richtig wäre. Da aber dies nicht der Fall ist, so bleibt nur noch übrig, den betreffenden Wert durch direkte Untersuchung zu ermitteln. Die Veränderung des Totalindex bei jeder Formveränderung der Linse macht wiederum die Ermittelung desselben sowohl an der toten Linse durch direkte Messung nach dem Vorgang von HELMHOLTZ (S. 88), wie an der lebenden nach dem Vorgang von BERLIN[1]) durch Vergleich der ruhenden und der akkommodierenden Linse illusorisch. Auf der anderen Seite dürfte diese Veränderung zusammen mit den Fehlerquellen, welche durch postmortale Veränderungen der physikalischen Brechungsindizes bedingt werden, den auffallend großen Unterschied der von HELMHOLTZ (S. 90) und STADFELDT[2]) gefundenen Werte 1,4519, 1,4414 bzw. 1,4260 bis 1,4434 erklären, da in der Art der Befestigung der Linse bei der Untersuchung ein variierender, auf den Wert des Totalindex einwirkender Faktor gegeben ist. Ob der Totalindex der akkommodationslosen Linse im lebenden Auge überhaupt an der toten Linse erhalten werden kann, scheint sogar sehr zweifelhaft, da dabei sämtliche statischen Verhältnisse, insbesondere auch die Verteilung der Spannung der Zonula zwischen den einzelnen Gruppen von Zonulafasern exakt nachgeahmt werden müssen.

Es steht hierdurch fest, daß die Brechkraft der Linse bzw. der Totalindex derselben nur am lebenden Auge ermittelt werden kann, wozu nur eine Methode

---

[1] E. BERLIN, Über eine Bestimmung des Totalindex der Linse am lebenden Auge. Arch. f. Ophth. XLIII. 1897. S. 287.

[2] a. a. O.

übrig bleibt, nämlich die Berechnung aus dem Refraktionsverluste des Auges bei der Linsenextraktion. Diese Frage wurde im Gebiete der Ophthalmologie aktuell, als in den beiden letzten Jahrzehnten die operative Behandlung der Myopie durch Entfernen der Linse in Aufschwung kam. Es ergab sich hierbei durch den Vergleich der Korrektion vor und nach der Operation, daß das schematische Auge von HELMHOLTZ den tatsächlichen Verhältnissen nicht hinreichend entspricht, indem der Totalindex der Linse zu groß, die Augenachse zu kurz ist.

Für diese Berechnung des Totalindex kann man nach BJERKE[1] die Refraktion des Auges vor und nach der Entfernung der Linse im scheinbaren Orte des optischen Zentrums der Linse bestimmen, wobei der Refraktionsverlust direkt der Brechkraft der Linse proportional ist, und die Approximation, welche darin liegt, daß man ein optisches Zentrum an Stelle der Hauptpunkte der Linse setzt, bei der erzielbaren Genauigkeit der Berechnung ohne Einfluß ist. Zur Berechnung eignet sich am besten folgende Methode. Die allgemeinen auf die Hauptpunkte der Hornhaut bezogenen Abbildungsgleichungen

$$B = A + D \qquad KB = A$$

ergeben, wenn δ der reduzierte Abstand des optischen Zentrums der Linse vom hinteren Hauptpunkt des Hornhautsystems, $\varkappa$ den Vergrößerungskoeffizienten in demselben optischen Zentrum und x den scheinbaren Ort desselben in bezug auf die vordere Hornhautfläche darstellen, somit $A\,B\,K$ durch bzw. $\frac{1}{x - H_h}\ \frac{1}{\delta}\ \varkappa$ ersetzt werden:

$$\varkappa = 1 - \delta D_h \qquad x = \frac{\delta}{\varkappa} + H_h .$$

Unter Beachtung der Tatsache, daß die Abstände des optischen Zentrums der Linse von den beiden Linsenflächen sich wie die Krümmungsradien verhalten, findet man mit den angegebenen schematischen Werten

$$\delta = \frac{0{,}05 + 3{,}6 + 2{,}25}{1{,}336} \text{ mm}$$

$$\varkappa = 0{,}80987 \qquad x = 5{,}4 \text{ mm} .$$

Wird die Brechkraft von Hornhaut-, Linsen- und Vollsystem mit bzw. $D_h\, D_l\, D_t$ bezeichnet, so ergibt die allgemeine Formel für die Zusammensetzung zweier Systeme

$$D_t = D_h + \varkappa D_l .$$

Stellen bei der scharfen Abbildung im Vollauge bzw. im linsenlosen Auge $A\,B$ bzw. $A_0\,B_0$ die im scheinbaren bzw. wirklichen Orte des optischen Zentrums der Linse gemessenen reduzierten Konvergenzen der Strahlenbündel dar, so ist

$$\varkappa^2 B = A + \varkappa D_t \qquad \varkappa^2 B_0 = A_0 + \varkappa D_h$$

und es resultiert, da die im linken Membrum stehenden Werte in beiden Gleichungen identisch sind,

$$A_0 - A = \varkappa^2 D_l .$$

Der Wert von A_0 ergibt sich aus der hinreichend bestätigten Erfahrung, daß die Mehrzahl der Staroperierten eine Brille von 10 bis 11 Dioptrien

[1] K. BJERKE, Über die Veränderung der Refraktion und Sehschärfe nach Entfernung der Linse. II. Arch. f. Ophth. LV. 2. 1903. S. 191.

braucht, um scharf in die Ferne zu sehen. Bei den bisher nicht recht gelungenen Bemühungen, diese Tatsache mit den bekannten Vorschlägen zu einem schematischen Auge in Einklang zu bringen, hat man einen erhöhten optischen Effekt der Korrektionsgläser für die Rechnung gewonnen, indem man einen großen Abstand des Glases vom Hornhautscheitel angenommen hat. So verlegt TREUTLER[1] den hinteren Pol des Korrektionsglases in den Abstand von 13 mm vom Hornhautscheitel und berechnet den Abstand des hinteren Hauptpunktes desselben von der Glasfläche zu 1,5 mm. Unter Zugrundelegung des mittleren Wertes der Korrektion findet er auf diese Weise den Mittelwert 80,735 mm für den Abstand des virtuellen Fernpunktes des linsenlosen Auges vom Hornhautscheitel, was einem Werte $A_0 = 13{,}27$ D. entsprechen würde.

Hierzu ist nur zu bemerken, daß dieser Wert sicher etwas zu hoch ist, da bei einer genauen Bestimmung der Refraktion der Abstand des Glases vom Auge so klein wie möglich gemacht wird, und da wohl nunmehr in den meisten Kliniken die Staroperierten nicht Wimpern tragen. Wenn ich trotzdem denselben Wert annehme, so betrachte ich demnach denselben als einen oberen Grenzwert.

Zur Berechnung der Brechkraft der Linse ist es nicht, wie angenommen zu werden pflegt, zulässig, einfach $A = 0$ zu setzen, denn erstens ist die normale, durch Untersuchung mit Gläsern ermittelte Refraktion des Auges in dem Alter, wo die überwiegende Mehrzahl der Stare extrahiert wird, nicht emmetropisch, und zweitens gibt diese Untersuchung wegen der Aberration nicht den in den Abbildungsgesetzen erster Ordnung anzuwendenden Wert längs der Achse. Während die Aberration des Vollauges dazu ausreicht, um einen Unterschied von wenigstens 1 D. zwischen diesem Werte und dem bei der Untersuchung der Refraktion mit Gläsern gefundenen zu bedingen, so dürfte ein solcher Unterschied im staroperierten Auge nicht vorhanden sein. Zwar habe ich ophthalmometrisch bewiesen, daß derjenige Teil der Hornhaut, welcher gewöhnlich vom oberen Lide unbedeckt bleibt und bei mäßiger Pupillengröße in Betracht kommt, eine geringe positive Aberration verursacht, und ich habe dasselbe durch ophthalmoskopische Untersuchung in einem Falle von Spontanresorption der Linse konstatiert, aber nach der Staroperation tritt eine ausgeprägte Abflachung des vertikalen Hornhautschnittes ein, welche den Effekt der Aberration beeinträchtigt, so daß die mit Gläsern gefundene Refraktion des staroperierten Auges mit größter Wahrscheinlichkeit der Refraktion auf der Achse entspricht. Während demnach der Wert von A_0 durch die Aberration unbeeinflußt ist, so ist der Wert von A gleich der Summe des Mittelwertes der Refraktion im durchschnittlichen Alter der Staroperierten und des durch die Aberration bedingten Unterschiedes der gemessenen Refraktion und der exakten Refraktion auf der Achse. Wenn ich nun den schematischen Wert $A = 0{,}75$ D. annehme, so dürfte ich somit einen unteren Grenzwert gewählt haben. Der aus obenstehender Formel erhaltene Wert der Brechkraft der Linse 19,1 D. dürfte somit sicher nicht zu klein sein. Da die Brechkraft der beiden Linsenflächen 5 bzw. 8,33.. D. beträgt, so ergibt sich als approximativer schematischer Wert der Brechkraft der Kernlinse der Betrag von 6 Dioptrien als ein wahrscheinlicher oberer Grenzwert. Bei der Berechnung eines schematischen Auges mit so

[1] Einige Bemerkungen zu den schematischen Augen. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. XL. 1902. S. 1.

geringer Brechkraft der Linse zeigt es sich nun, daß nur mit diesem oberen Grenzwerte eine Übereinstimmung der Achsenlänge mit den Ergebnissen anatomischer Untersuchungen erreicht werden kann, weshalb ich auch denselben der Berechnung der Indizialgleichung zugrunde lege. Wenn die Koordinaten der Linsenpole bzw. Brechungsindices und Krümmungsradien in demselben mit $x_1\, x_2\, \mu_1\, \mu_2\, \varrho_1\, \varrho_2$, der Brechungsindex im Linsenzentrum bzw. im Punkte $x = 0$, $y = \pm 4{,}2$ mit $\mu_0\, \mu_3$ und der approximative Wert der Brechkraft der Kernlinse mit D bezeichnet werden, so habe ich demnach folgende Werte mit dem Millimeter als Längeneinheit in die Rechnung eingeführt:

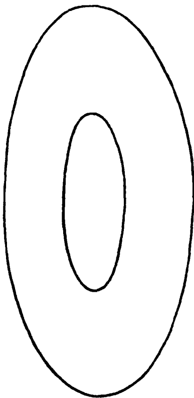
$$x_1 = -1{,}7 \qquad x_2 = 1{,}9 \qquad \varrho_1 = 10 \qquad \varrho_2 = -6 \qquad D = 0{,}006$$
$$\mu_0 = 1{,}406 \qquad \mu_1 = \mu_2 = 1{,}386 \qquad \mu_3 = 1{,}376.$$

Dieselben ergeben für $p_m = 0$ folgende Werte der Konstanten der Indizialgleichung

$$m = 0{,}012537 \qquad n = 0{,}0010475$$
$$M = -0{,}0023004 \qquad N = 0{,}00011470$$
$$p_o = 0{,}0011150 \qquad p_n = 0{,}0016012.$$

Es ist zu beachten, daß diese Konstanten nicht Zahlenwerte sind, sondern in physikalischer Bedeutung eine Dimension haben, somit nur für die gewählte Längeneinheit gelten, und daß die Einheit der Brechkraft und der reduzierten Konvergenz, wenn die Länge in Millimetern gemessen wird, dem Tausendfachen der Dioptrie gleichkommt.

Unter Anwendung der Indizialgleichung habe ich die Schnittlinien der Isoindizialflächen mit einer Meridianebene für den Index 1,386 und 1,404 durch Berechnung einer hinreichenden Anzahl Koordinaten konstruiert. Die äußere Linie (Fig. 131) fällt somit nicht mit der Oberfläche der Linse zusammen, sondern hat nur in den Polen eine Berührung zweiter Ordnung mit derselben. Das längs der Achse gültige parabolische Gesetz der Indexvariation wird dadurch illustriert, daß der Indexunterschied gegenüber dem Linsenzentrum an der äußeren Linie zehnmal so groß ist wie an der inneren.


Fig. 131.

Für den exakten Wert der Brechkraft der Kernlinse und die Lage der Hauptpunkte derselben ergibt sich

$$D_k = 0{,}005985 \qquad H = 0{,}22921 \qquad H' = 0{,}25752,$$

wo die Abstände vom Linsenzentrum gerechnet sind. Der Totalindex erhält den mit Hinsicht auf die bisherigen Vorstellungen auffallend geringen Wert 1,4085. So lange als die exakten Abbildungsgleichungen in heterogenen Medien unbekannt blieben, konnte man dieselben nicht besser als mit dem fiktiven Totalindex illustrieren. Seitdem aber die Kernlinse in dioptrischer Hinsicht bekannt ist, dürfte es am geeignetsten sein, den Effekt derselben durch die äquivalente Kernlinse verständlich zu machen. Ich verstehe hierunter eine Linse mit dem Brechungsindex des Linsenzentrums in einem Medium mit dem Brechungsindex der Linsenpole suspendiert, welche dieselbe Brechkraft und dieselben Hauptpunkte hat wie die reelle Kernlinse und deren Brechkraft auf die beiden Flächen in demselben Verhältnisse verteilt ist, wie in der reellen

auf die beiden vor und hinter dem Linsenzentrum belegenen Teile der Linsensubstanz. Der Vorzug der Anwendung der äquivalenten Kernlinse liegt darin, daß die Linse als Ganzes in bezug auf die Abbildungsgesetze erster Ordnung genau die optischen Eigenschaften der Wirklichkeit hat, während mit dem Totalindex die Hauptpunkte der Linse eine falsche Lage bekommen. Für Radien und Dicke der äquivalenten Kernlinse ergibt sich in Millimetern

$$r_1 = 7{,}9108 \qquad r_2 = -\,5{,}7605 \qquad d = 2{,}4187$$

und ihre Hauptpunkte fallen mit den Hauptpunkten der reellen Kernlinse zusammen, wenn der Abstand ihrer vorderen Fläche vom vorderen Linsenpol 0,5460 mm ist.

Die Zusammensetzung der drei Einzelsysteme unter Anwendung der Formeln S. 245 ergibt für das Linsensystem in toto

$$D_l = 19{,}1107 \qquad 1000\, n_2\, H_l = 2{,}07792 \text{ mm} \qquad 1000\, n_2\, H_l' = -\,1{,}39317 \text{ mm},$$

wo HH', wie allgemein, die reduzierten Abstände der beiden Hauptpunkte von den betreffenden Linsenflächen darstellen.

Im schematischen Auge empfiehlt es sich, das Linsensystem als ein Umdrehungssystem zu behandeln, wie auch die Hornhautflächen als Umdrehungsflächen dargestellt werden, obwohl die physiologische Form eine astigmatische ist. Letzteres ist mit größter Wahrscheinlichkeit auch bei der Linse der Fall. Denn der Astigmatismus des Vollsystems — der Totalastigmatismus des normalen Auges — erreicht unter physiologischen Verhältnissen nicht den Grad des Hornhautastigmatismus, wonach ein inverser Linsenastigmatismus vorhanden sein muß. Wie oben dargelegt worden ist, haben die ophthalmometrischen Untersuchungen der Hornhaut ergeben, daß ein in der Nähe der Hornhautbasis senkrecht zur ophthalmometrischen Achse gelegter Schnitt eine oblonge Form mit größerem vertikalem Durchmesser hat. Ein solches Verhalten ist aber kaum denkbar, ohne daß die ganze vordere Bulbuspartie eine ähnliche Form hat, und es sind hierdurch statische Verhältnisse gegeben, welche einen inversen Linsenastigmatismus zu verursachen geeignet sind, indem sowohl eine entsprechend oblonge Form der Linse wie eine durch entsprechend stärkere Zonularspannung bedingte geringere Krümmung des Vertikalschnittes diese Folge haben muß. Wegen der den Methoden anhaftenden Fehlerquellen dürften aber die bisherigen Versuche, den Astigmatismus der Linse am lebenden Auge zu messen, nicht auf die erforderliche Zuverlässigkeit Anspruch machen können. Dieselben ergaben im allgemeinen einen direkten Astigmatismus der Vorderfläche, einen inversen der hinteren, ein Resultat, welches an und für sich mit hinreichender Deutlichkeit seine Abstammung aus den durch die verschiedene Abflachung der Hornhaut in verschiedenen Richtungen und durch die Dezentration der brechenden Flächen bedingten Fehlerquellen wahrscheinlich macht. Hinzuzufügen ist hier nur noch, daß eine astigmatische Brechung in der Kernlinse durch die Form der Isoindizialflächen bedingt sein kann, ohne daß dabei eine astigmatische Form der Linsenflächen vorhanden zu sein braucht.

3. Das brechende System des Auges.

Bei der Zusammensetzung des Hornhaut- und Linsensystems hat man in die allgemeinen Formeln den Ausdruck

$$1000\, n_2\, \delta = 0{,}0506 + 3{,}6 + 1000\, n_2\, H_l$$

einzusetzen, wonach dieselben für das Vollsystem

$$D_t = 58{,}636 \qquad 1000\, H_t = 1{,}3975 \qquad 1000\, n_2\, H_t' = -\,4{,}2061$$

ergeben, wodurch die Daten des schematischen Auges bekannt sind. Ich stelle sie hier zusammen, indem ich der Berechnung die äquivalente Kernlinse zugrunde lege. Da in den Daten derselben nur drei Dezimalen mitgenommen werden, so ergibt sich ein Unterschied gegenüber obenstehenden Zahlenwerten, welcher bis zu einer Einheit der letzten Dezimale steigen kann.

Schematisches Auge in Akkommodationsruhe.

Brechungsindex der Hornhaut	1,376	
„ des Kammerwassers und Glaskörpers	1,336	
„ der Linse	1,386	
„ der äquivalenten Kernlinse	1,406	
Ort der vorderen Hornhautfläche	0.	
„ „ hinteren „	0,5	mm
„ „ vorderen Linsenfläche	3,6	„
„ „ „ Fläche der äquivalenten Kernlinse	4,146	„
„ „ hinteren „ „ „ „	6,565	„
„ „ „ Linsenfläche	7,2	„
Krümmungsradius der vorderen Hornhautfläche	7,7	„
„ „ hinteren Hornhautfläche	6,8	„
„ „ vorderen Linsenfläche	10,0	„
„ „ „ Fläche der äquiv. Kernlinse	7,911	„
„ „ hinteren „ „ „ „	−5,76	„
„ „ „ Linsenfläche	−6,0	„
Brechkraft der vorderen Hornhautfläche	48,83	D.
„ „ hinteren „	−5,88	„
„ „ vorderen Linsenfläche	5,0	„
„ „ äquivalenten Kernlinse	5,985	„
„ „ hinteren Linsenfläche	8,33	„
Hornhautsystem.		
Brechkraft	43,05	D.
Ort des ersten Hauptpunktes	−0,0496	mm
„ „ zweiten „	−0,0506	„
Vordere Brennweite	−23,227	„
Hintere „	31,031	„
Linsensystem.		
Brechkraft	19,11	D.
Ort des ersten Hauptpunktes	5,678	mm
„ „ zweiten „	5,808	„
Brennweite	69,908	„
Vollsystem des Auges.		
Brechkraft	58,64	D.
Ort des ersten Hauptpunktes	1,348	mm
„ „ zweiten „	1,602	„
„ „ ersten Brennpunktes	−15,707	„
„ „ zweiten „	24,387	„

Vordere Brennweite	−17,055	mm
Hintere „	22,785	„
Ort der Netzhautfovea	24,0	„
Hypermetropie auf der Achse	1,0	D.

Der bei der Untersuchung eines solchen Auges sich ergebende Refraktionszustand würde Emmetropie sein, wie unten bei der Darstellung der Aberration bewiesen werden soll. Fig. 132 stellt einen Durchschnitt desselben dar, wo die Flächen als kugelförmig behandelt worden sind.

Wie aus dem Obenstehenden hervorgeht, wird die Achsenlänge des schematischen Auges durch die Hornhautrefraktion und durch die mittlere Refraktion des aphakischen Auges bestimmt, wobei die Achsenlänge um so kleiner wird, je größer die Brechkraft der Hornhaut und die mittlere Hypermetropie des aphakischen Auges ist. Da ich nun durch Berücksichtigung des Unterschiedes der Krümmungsradien der Hornhaut im Scheitelpunkte der optischen Zone von den mittleren Krümmungsradien dieser Zone wohl den größten Wert der Brechkraft der Hornhaut angewendet habe, der mit den vorliegenden Messungsergebnissen in Übereinstimmung gebracht werden kann, und da dasselbe von dem der Berechnung zugrunde gelegten Werte der Hypermetropie des aphakischen Auges gilt, so ist es einleuchtend, daß die Achse des schematischen Auges nicht, ohne den Tatsachen Gewalt anzutun, kürzer gemacht werden kann. Wird die Linse aus dem schematischen Auge entfernt, so ist es sogar um 0,1 D. hypermetropischer als den Anforderungen von Treutler entsprechen würde. Die Achsenlänge von 24 mm liegt auch eben innerhalb der Grenzen, welche er als durch die Messungen am Leichenauge gezogen ansieht. Ohne diesen Messungen einen allzu großen Wert beizulegen, glaube ich mich aber doch der Auffassung anschließen zu müssen, daß dieselben eine größere schematische Achsenlänge als 24 mm unwahrscheinlich machen. Nach der Angabe von Mauthner[1] ergeben die Messungen an Leichenaugen am häufigsten Werte, welche um 25 mm herum liegen, was, wenn 1 mm für die Dicke der Sehnenhaut und Gefäßhaut gerechnet wird, gut stimmen würde. Aber andererseits gibt es auch eine große Zahl von Messungen, welche niedrigere Werte ergeben haben. Bei der Verwertung solcher Messungen ist aber zu beachten, daß durch postmortale Veränderungen die Achsenlänge des Auges vermindert wird, und daß es sogar nicht wahrscheinlich ist, daß man die ursprüngliche Länge durch künstliche Wiederherstellung des in vivo vorhandenen intraokularen Druckes erreichen könnte, da eine postmortale Verdickung der Kornea und Sklera wegen des anatomischen Baues derselben von einer Verkleinerung des Bulbusraumes begleitet sein kann.

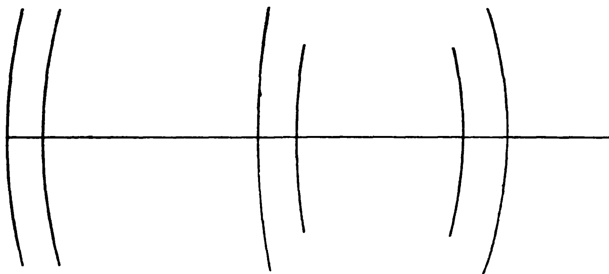


Fig. 132

[1] L. Mauthner, Vorlesungen über die optischen Fehler des Auges. Wien 1876. S 422.

Die auffallend niedrige Brechkraft der Linse des schematischen Auges folgt mit mathematischer Notwendigkeit aus der Refraktionsänderung bei der Entfernung der Linse. Dieselbe kann, wenn auf den Einfluß der Aberration Rücksicht genommen wird, im akkommodationslosen Auge nicht größer sein, als aus dem Obenstehenden hervorgeht. Die mathematisch bewiesene Abhängigkeit des Totalindex der Linse von der Form derselben ermöglicht erst, ein schematisches Auge zu berechnen, welches mit den Tatsachen in keinen Widerspruch gerät, indem eine so geringe Brechkraft der Linse unter der Annahme der Gültigkeit des Gesetzes von MATTHIESSEN in unlösbarem Widerspruche mit den Ergebnissen der refraktometrischen Messungen stehen mußte und außerdem der niedrige Totalindex im akkommodierenden Auge nicht ausreichen würde. Erteilt man dem schematischen Auge durch Verlängerung der Achse bis zum Werte 30,98 mm eine Myopie von solchem Grade, daß es nach Entfernung der Linse emmetropisch wird, so beträgt diese Myopie längs der Achse im vorderen Hauptpunkte 13,16 D., und der Fernpunkt liegt 74,58 mm vor dem Hornhautscheitel. Diese Myopie würde von einem Glase 16,7 D. korrigiert werden, dessen hinterer Hauptpunkt nach TREUTLER 14,5 mm vor dem Hornhautscheitel liegt, wenn nämlich nicht auf den Effekt der Aberration Rücksicht genommen werden müßte. Wird aber der Einfluß der Aberration in Rechnung gezogen, so ergibt sich eine Gläserkorrektion von rund 18 Dioptrien, welche sich vollkommen mit den Ergebnissen der klinischen Untersuchung deckt.

Wenn es aber somit unumgänglich ist, im exakten schematischen Auge die Aberration zu berücksichtigen, so empfiehlt es sich auf der anderen Seite, ein vereinfachtes schematisches Auge zu berechnen, in welchem von der zerstreuenden Wirkung der hinteren Hornhautfläche abgesehen, die Linse homogen und das ganze System als aberrationslos angenommen wird. Da aber die Fiktion einer homogenen Linse schon an und für sich eine solche Abweichung vom tatsächlichen Verhalten enthält, daß die Lage der Hauptpunkte der Linse nicht exakt wird, so empfiehlt es sich wenigstens, die Vorteile der Fiktion auszunützen, indem ein optisches Zentrum der Linse angenommen wird. Wo man mit falscher Lage der Hauptpunkte rechnet, hat es keinen Sinn, den Abstand derselben voneinander zu berücksichtigen. Die in einem solchen vereinfachten schematischen Auge anzuwendende äquivalente Hornhautfläche bekommt einen Krümmungsradius, der annähernd mit dem ophthalmometrisch gefundenen schematischen Radius der optischen Zone übereinstimmt, weshalb ich diesen angenommen habe. Unter Mitnahme von nur drei Dezimalen im Werte für den Totalindex der Linse ergeben sich folgende Werte eines vereinfachten schematischen Auges, in welchem die angenommenen Werte, vom Totalindex der Linse abgesehen, dieselben sind wie im letzten schematischen Auge von HELMHOLTZ[1], wenn die beiden letzten Dezimalen im Werte des Krümmungsradius der Hornhaut und die letzte im Werte des Brechungsindex von Kammerwasser und Glaskörper weggelassen werden. (Die von HELMHOLTZ angewendeten Zahlen sind bzw. 1,4371, 7,829, 1,3365.) Bei der Berechnung ist das optische Zentrum der Linse als Ort der Linsenflächen anzuwenden.

[1] Dieses Handbuch. 2. Aufl. S. 140.

Vereinfachtes schematisches Auge.

Angenommen.		
Brechungsindex des Kammerwassers und Glaskörpers	1,336	
„ der Linse	1,413	
Krümmungsradius der äquivalenten Hornhautfläche	7,8	mm
„ „ vorderen Linsenfläche . .	10,0	„
„ „ hinteren „ . .	−6,0	„
Ort des optischen Zentrums der Linse	5,85	„
Berechnet.		
Brechkraft der Hornhaut	43,08	D.
„ der Linse	20,53	„
„ des brechenden Systems des Auges . .	59,74	„
Vordere Brennweite der Hornhaut	−23,214	mm
Hintere „ „ „	31,014	„
Brennweite der Linse	65,065	„
Vordere Brennweite des Auges	−16,740	„
Hintere „ „ „	22,365	„
Ort des vorderen Hauptpunktes	1,505	„
„ „ hinteren „	1,631	„
„ „ vorderen Brennpunktes	−15,235	„
„ „ hinteren „	23,996	„

Ein dem exakten schematischen Auge entsprechendes reduziertes Auge würde mit dem Brechungsindex $^4/_3$ den Krümmungsradius 5,7 mm haben.

Je nach der bei einem vorliegenden Zwecke erforderlichen Genauigkeit wird das eine oder andere dieser Modelle zur Anwendung kommen können. Von dem vereinfachten schematischen Auge soll nur ausdrücklich hervorgehoben werden, daß der Totalindex der Linse wegen der Nichtberücksichtigung der Aberration größer ist, als dem tatsächlichen Verhalten entspricht, indem derselbe im exakten schematischen Auge nur 1,4085 beträgt, daß somit nur dieses Auge zu einer exakten Untersuchung des Strahlenganges in der Linse dienen kann. Überhaupt darf im vereinfachten schematischen Auge nie mit der Brechung in den einzelnen Linsenflächen gerechnet, sondern muß immer die Linse als ein unzerlegbares optisches System behandelt werden.

Im schematischen Auge kann auf die Dezentration der brechenden Flächen sowie auf den schiefen Durchgang der Visierlinie keine Rücksicht genommen werden, weil die Dezentrationen zu wenig bekannt und auch dem Grade nach zu variierend erscheinen. Da schon die vordere Hornhautfläche einer exakten vertikalen Symmetrieebene entbehrt, so ist es einleuchtend, daß die Spiegelbilder von endlich großen Objekten keine exakte Zentrierung des optischen Systems angeben können. Bei dem von Helmholtz S. 95 dargestellten Versuch ist aber der Einfluß der Asymmetrie der Hornhaut durch Zugrundelegung der Schmiegungsellipse möglichst eliminiert, und es dürfte keinem Zweifel unterliegen, daß dieser Versuch eine Dezentration der Linse in bezug auf die Achse dieser Ellipse beweist. Da aber wegen des asymmetrischen Baues der Hornhaut das Zusammenfallen der berechneten Ellipsenachse mit einer Hornhautnormale nicht sichergestellt ist, so ist eine allgemeine Dezentration der Achse der Linse in bezug auf die durch das Pupillenzentrum gehende Hornhautnormale hierdurch

nicht bewiesen. Ebensowenig wird dies durch die nach TSCHERNINGS[1] Methode ausgeführten Untersuchungen bewiesen. Bringt man bei der Beobachtung der Spiegelbilder in den Linsenflächen Fernrohrachse und zwei Lichter, am besten die ophthalmometrischen Nernstlampen in eine und dieselbe vertikale Ebene, so müßte, falls eine vertikale Symmetrieebene vorhanden wäre, eine Stellung des Auges gefunden werden können, bei welcher sämtliche sechs Spiegelbilder in einer geraden Linie liegend gesehen würden. Dies ist aber im allgemeinen nicht der Fall. Beim Blick geradeaus ins Fernrohr sieht man die in der vorderen bzw. hinteren Linsenfläche entstehenden Spiegelbilder nasal- bzw. temporalwärts von den Hornhautspiegelbildern liegen. Wird dann die Blicklinie nasalwärts bewegt, so kommen in den meisten Fällen zunächst die Spiegelbilder der hinteren Linsenfläche in dieselbe Linie wie die Hornhautbilder, dann in dieselbe Linie wie die Spiegelbilder in der vorderen Linsenfläche, und schließlich kommen diese in dieselbe Linie wie die Hornhautspiegelbilder. Dieser Versuch beweist, daß tatsächlich keine vertikale Symmetrieebene des ganzen optischen Apparates vorhanden ist — was übrigens schon die ophthalmometrischen Untersuchungen der Hornhaut gelehrt haben — und würde, wenn die Flächen genau sphärisch wären, oder die Untersuchung bei sehr kleinen Einfallswinkeln ausgeführt werden könnte, beweisen, daß die Achse der Linse nicht mit einer Hornhautnormale zusammenfiele, sondern nasalwärts vom Krümmungszentrum der Hornhaut verliefe. Nun kann aber die Untersuchung nur bei sehr großen Einfallswinkeln mit hinreichender Schärfe ausgeführt werden, indem sogar gewöhnlich eine künstliche Erweiterung der Pupille vonnöten ist, und hierbei ist es nicht mehr erlaubt, an Stelle der Hornhaut die optische Zone derselben zu setzen, sondern es macht sich die in verschiedenen Richtungen ungleiche periphere Abflachung geltend, weshalb auch die Versuche nicht beweiskräftig sind. Dasselbe gilt von der Untersuchung der vertikalen Dezentration, wobei die Lichter in der durch die Fernrohrachse gelegten Horizontalebene stehen und in den typisch normalen Augen eine gewisse Erhebung des Blickes über diese Ebene nötig ist, um die verschiedenen Spiegelbilder in eine Linie zu bringen.

Betreffs der Dezentration der brechenden Flächen ist also vorläufig nur bekannt, daß eine Symmetrieachse des optischen Systems nicht vorhanden ist, und daß die optische Achse der Linse, wenn unter diesem Begriffe eine den beiden Linsenflächen gemeinsame Normale verstanden wird, die Hornhaut in einem nach außen und gewöhnlich etwas nach unten vom ophthalmometrischen Achsenpunkte belegenen Punkte schneidet, wie es auch mit der durch den Mittelpunkt der mittelgroßen Pupille gehenden Hornhautnormale der Fall ist. Daß aber diese oben als optische Achse des Auges bezeichnete Normale nicht mit der optischen Achse der Linse zusammenfalle, bleibt vorläufig unbewiesen. Obwohl ersichtlicherweise kleine Abweichungen höchst wahrscheinlich sind, so können sie doch, um so weniger da sie noch nicht einwandfrei konstatiert worden sind, nicht in Rechnung gezogen werden. Daß sie, wenn vorhanden, ohne Einfluß auf die Abbildung im Auge sind, beweisen die Untersuchungen des Auges mit einem leuchtenden Punkt (s. unten).

Praktisch hat man also nur mit der Dezentration zu rechnen, welche durch die Neigung der Visierlinie gegen die optische Achse des Auges definiert ist,

[1] Beiträge zur Dioptrik des Auges. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane. III. 1892. S. 429 und an anderen Stellen.

und welche auch durch die Dezentration der Pupille in bezug auf die ophthalmometrische Hornhautachse bestimmt werden kann. Daß bei der praktischen Ermittelung der Lage dieser Achse immer bei einer bestimmten, durch die Beleuchtung zu erzielenden, mittleren Pupillengröße — am besten 4 mm — untersucht werden muß, wurde oben hervorgehoben. Denn obwohl der scheinbare Mittelpunkt der Pupille bei geringen Variationen der Größe unverändert zu sein scheint, so können bei größeren Variationen sehr beträchtliche Unterschiede vorkommen. So habe ich in einem Falle bei der Untersuchung nach der oben S. 271 beschriebenen Methode unter Anwendung des Ophthalmometers von Helmholtz für den Neigungswinkel der Visierlinie zur optischen Achse bei maximaler Pupille 6,5°, bei minimaler 2,7° erhalten, woraus, wenn die Hornhaut sphärisch wäre, eine bei der Verengerung eintretende Verschiebung des Zentrums der Pupille nasalwärts im Betrage von 0,28 mm hervorgehen würde. Nun kann aber erstens ein Teil dieser Verschiebung durch die asymmetrische Abflachung der Hornhaut im horizontalen Meridiane vorgetäuscht werden, und zweitens dürfte ein so großer Unterschied zu den Ausnahmen gehören. Mit einer anderen, obwohl weniger empfindlichen Methode ist Hummelsheim[1] zu dem Resultate gekommen, daß sich die Pupille konzentrisch verengert.

Da allgemein eine durch punktweise Korrespondenz gekennzeichnete optische Abbildung nur in einem sehr kleinen Bezirke in der Umgebung der Achse eines optischen Systems vorkommt, so wird dieser Tatsache in vollkommenster Weise von der anatomischen Beschaffenheit der Netzhaut entsprochen, indem dieselbe nur in einer sehr kleinen Ausdehnung geeignet ist, eine scharfe Abbildung zu verwerten. Die Güte der peripherischen Abbildung im Auge ist deshalb von untergeordneter Bedeutung. Wenn das optische System in erster Annäherung als ein zentriertes Umdrehungssystem behandelt wird, so stellen die beiden Bildflächen nach vorn konkave Umdrehungsflächen dar, von welchen die erste, auf welcher die Bildlinien von Parallelkreisen belegen sind, dem optischen Apparate näher liegt als die zweite, auf welcher Meridianlinien abgebildet werden. Seit Young[2] haben sich mehrere Forscher damit bemüht, diese Bildflächen auf rechnerischem Wege zu konstruieren bzw. den Astigmatismus bei der peripheren Abbildung zu berechnen, wobei die Resultate im allgemeinen eine Lage der Netzhaut in der Nähe der Bildflächen oder zwischen denselben angeben. Solchen Berechnungen kann aber, so lange die exakte Form der hinteren Linsenfläche unbekannt bleibt, kein Wert beigemessen werden. Den Einfluß der Schichtung der Linse auf diesen Astigmatismus hatte seinerzeit Hermann[3] berechnet. Sein Resultat, daß eine Verringerung des Astigmatismus durch die Schichtung bewirkt würde, beruht teils auf seinen Voraussetzungen, teils darauf, daß die von ihm angewendeten Differentialgleichungen für die erste Abbildung nicht richtig sind. Die Untersuchung der oben angegebenen schematischen Linse mit kontinuierlich variablem Brechungsindex hat ergeben, daß für einen Strahl, welcher unter einem Winkel von 25° im Zentrum der vorderen Linsenfläche einfällt, und wenn die hintere Linsenfläche als parabolisch angesehen wird, der Astigmatismus größer ist als in einer homogenen Linse mit dem entsprechenden Totalindex. Von den Methoden zur direkten Untersuchung

[1] Pupillenstudien, Arch. f. Augenh. LVII. S. 33. 1907.
[2] Th. Young, *On the mechanism of the eye. Philos. Transactions*, 1801.
[3] a. a. O.

der peripheren Abbildung auf der Netzhaut ergibt die Beobachtung des Bildes einer Lichtquelle durch die Sclera hindurch, wie sie bei seitlichem Lichteinfall in hervorstehenden Augen möglich ist, die am wenigsten sicheren Resultate. Die Refraktionsbestimmung im aufrechten ophthalmoskopischen Bilde dürfte auch nicht mit der skiaskopischen Methode wetteifern können, welche wohl bisher die sichersten Resultate ergeben hat. DRUAULT[1] fand mit dieser Methode, daß die Netzhaut wahrscheinlich zwischen beiden Bildflächen, der zweiten, hinter ihr belegenen näher liegt als der ersten.

Da die Visierlinie mit der optischen Achse einen endlichen Winkel bildet, so gehört schon die Abbildung in der Fovea centralis der Netzhaut streng genommen in das Gebiet der peripheren. Der resultierende Astigmatismus beträgt aber bei einem Winkel von 5^0 nur ungefähr $^1/_{10}$ D., wie ich durch Rechnung am schematischen Auge von HELMHOLTZ bewiesen habe.[2] (TSCHERNING hat diesen Astigmatismus bei verschiedenen Winkeln berechnet und gibt viel höhere Zahlen an, was aber darauf beruht, daß er teils eine falsche Formel angewendet hat, teils auch diese Winkel mit den Einfallswinkeln verwechselt zu haben scheint. Wie aus den Formeln S. 239 hervorgeht, verhält sich die Brechkraft bei der ersten Abbildung zu der Brechkraft bei der zweiten wie $1 : \cos i \cos i'$. Dieses Verhältnis gibt aber nicht ohne weiteres den Astigmatismus an, weil bei der ersten Abbildung die Hauptpunkte nicht mit dem Inzidenzpunkt zusammenfallen. TSCHERNING[3] hat aber nicht nur an der Stelle des richtigen das Verhältnis $1 : \cos^2 i$ angewendet, sondern auch die Abstände der brechenden Flächen voneinander und von den bezüglichen Hauptpunkten vernachlässigt, was zusammen mit der Verwechselung der Winkel die falschen Resultate bedingt.)

III. Die Refraktion.

Unter der Refraktion des Auges wird die optische Einstellung desselben verstanden, welche sich aus der Achsenlänge und der Brechkraft des optischen Apparates ergibt. Der fest eingebürgerte Name ist insofern weniger glücklich, als er den Gedanken nur auf den einen Faktor der optischen Einstellung leitet, während die verschiedenen Refraktionszustände allgemein durch Verschiedenheit des anderen Faktors bedingt werden. Da in der Optik immer mehr eingesehen wird, daß sämtliche Abstände in den Abbildungsformeln in einer und derselben Richtung positiv gerechnet werden sollen — weil sonst bei dem Vorzeichenwechsel sich leichter Fehler einschleichen —, so hat man unter Zugrundelegung dieses Prinzips bei der Darstellung der Refraktion des Auges diese Abstände entweder in der Richtung der Lichtbewegung, wie in sonstigen Darstellungen üblich, positiv zu rechnen oder umgekehrt. Letzteres geschah allgemein, bis HESS[4] erstere, theoretisch richtigere Darstellungsweise einführte.

[1] *Astigmatisme des rayons pénétrant obliquement dans l'oeil. Application de la skiaskopie. Arch. d'ophth.* XX. 1900. S. 21.

[2] a. a. O. Skand. Arch. f. Physiol. II.

[3] a. a. O. *Encyclopédie française d'ophthalmologie.* III. S. 185.

[4] C. HESS, Die Refraktion und Akkommodation des menschlichen Auges und ihre Anomalien. Leipzig 1902. Sonderabdruck aus GRAEFE-SAEMISCH, Handb. d. Augenheilk. 2. Aufl. II. T. XII. Kap.

Nach derselben ist somit der Fernpunkts- bzw. Nahepunktsabstand negativ, wenn die bezüglichen Punkte reell sind. Der geringe Nachteil, welcher für den nicht physikalisch gebildeten Mediziner darin liegt, daß er sich diese Anschauungsweise aneignen muß, ist zu unbedeutend, um gegenüber den dadurch gewonnenen Vereinfachungen in die Wagschale gelegt werden zu können, weshalb ich hier in der Überzeugung, daß man in der medizinischen Optik diese Vorteile würdigen wird, den von HESS eingeschlagenen Weg befolge.

Die Einstellung des Auges wird dann durch die Konvergenz des bei der scharfen Abbildung auf der Netzhaut in dasselbe einfallenden Strahlenbündels gemessen, und es bleibt zunächst die Wahl übrig, in welchem Punkte diese Konvergenz gemessen werden soll. Wegen der einfacheren Form der auf die Hauptpunkte bezogenen Abbildungsgleichungen empfiehlt sich hierzu der vordere Hauptpunkt des Auges. In der allgemeinen Gleichung

$$B = A + D$$

ist dann A die in Dioptrien ausgedrückte Refraktion des Auges, D die Brechkraft des optischen Systems und $\frac{1}{B} = b$ der reduzierte Abstand der Netzhaut vom hinteren Hauptpunkte, welcher die reduzierte Achsenlänge genannt werden mag, während $a = \frac{1}{A}$ den Abstand des scharf gesehenen Punktes vom vorderen Hauptpunkte bedeutet. Aus praktischen Gründen ist es aber wünschenswert, die Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels auch in dem Punkte messen zu können, wo die Brille, oder genauer bestimmt der hintere Hauptpunkt derselben getragen wird. Wenn g der Abstand des ersten Hauptpunkts des Auges von diesem Punkte ist, nach welcher Definition somit g immer positiv ist, A_g die Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels in demselben darstellt, so hat man

$$\frac{1}{A_g} = \frac{1}{A} + g \qquad A_g = \frac{A}{1 + gA} \qquad A = \frac{A_g}{1 - gA_g}.$$

Da in diesen Ausdrücken g den Wert von 15 mm, A bzw. A_g den Wert von 20 D. selten übersteigen, so erhält man nur einen in praktischer Hinsicht belanglosen Fehler, wenn das Produkt g^2A^2 bzw. $g^2A_g^2$ vernachlässigt wird, wobei sich die für den praktischen Gebrauch hinreichend genauen Approximativformeln

$$A_g = A(1 - gA) \qquad A = A_g(1 + gA_g)$$

ergeben, deren Inhalt, wenn A_g nach HESS als der Korrektionswert der Refraktion bezeichnet wird, damit gleichbedeutend ist, daß, wenn g in Zentimetern gemessen wird, der Unterschied zwischen Refraktion und Korrektionswert numerisch gA % bzw. gA_g % beträgt, der Korrektionswert immer algebraisch kleiner als die Refraktion ist. Korrektionswert und Refraktion werden in der ophthalmologischen Literatur auch als Gläserrefraktion bzw. Hauptpunktrefraktion bezeichnet. Bei Myopie ist somit die Gläserrefraktion numerisch größer als die Hauptpunktrefraktion, bei Hypermetropie umgekehrt.

Da durch die Akkommodation die optische Einstellung des Auges verändert wird, so gibt es eine innerhalb der vom Fernpunkt und Nahepunkt gegebenen

Grenzen belegene Unendlichkeit von Refraktionszuständen. Wenn rp den Abstand des Fernpunktes bzw. Nahepunktes vom ersten Hauptpunkt darstellen, RP die entsprechenden Konvergenzwerte sind, so kann das Auge jede zwischen diesen Werten belegene Refraktion haben und die Differenz

$$R - P$$

ist die Akkommodationsbreite, indem durch die Akkommodation zwar die Brechkraft des optischen Systems vermehrt, die Refraktion aber vermindert wird. Wenn aber schlechthin von der Refraktion eines Auges gesprochen wird, versteht man immer darunter die statische Refraktion, die optische Einstellung für den Fernpunkt, bei welcher die Akkommodation erschlafft ist. Tritt dieselbe in Wirksamkeit, so liegt ein dynamischer Refraktionszustand vor, und der kleinste Grenzwert der dynamischen Refraktion entspricht der Nahepunkteinstellung des Auges.

Die Ametropie unterscheidet sich von der Emmetropie dadurch, daß die Refraktion einen endlichen Wert hat, und zwar ist derselbe bei Hypermetropie positiv, bei Myopie negativ. Die Gläserrefraktion stellt den Wert desjenigen Glases dar, durch welches das ametropische Auge emmetropisch gemacht wird, woher auch der Name Korrektionswert.

Zur Bestimmung der Refraktion ist im allgemeinen die Kombination des Auges mit einem optischen Instrumente nötig. Wird die Brechkraft desselben mit D_0 bezeichnet, während D die Brechkraft des optischen Systems des Auges, D_t die des kombinierten Systems darstellt, und δ der Abstand, bzw. beim Untertauchen des Auges in einer Flüssigkeit der reduzierte Abstand des vorderen Hauptpunktes des Auges vom hinteren Hauptpunkte des mit demselben zu kombinierenden Systems ist, so geben die Formeln

$$D_t = D_0 + D - \delta D_0 D \qquad H_t = \frac{\delta D}{D_t} \qquad H_t' = -\frac{\delta D_0}{D_t}$$

die Daten des kombinierten Systems. Wird nun allgemein die in den Hauptpunkten des vorgeschalteten Systems gemessene Konvergenz, bzw. reduzierte Konvergenz, wenn das System nicht von Luft umgeben ist, durch $A_0 = \frac{1}{a_0}$ und $B_0 = \frac{1}{b_0}$ bezeichnet, während $ABab$ dieselbe Bedeutung für das Auge und $A_t B_t a_t b_t$ für das zusammengesetzte System haben, wobei also mit reduzierten Abständen gerechnet wird, so ist B_0 die im zweiten Hauptpunkte des vorgeschalteten Systems gemessene Refraktion des Auges, und man erhält allgemein die Hauptpunktrefraktion aus dem Ausdrucke

$$A = \frac{A_0 + D_0}{1 - \delta(A_0 + D_0)},$$

aus welchem hervorgeht, daß bei der gewöhnlichen Untersuchung mit Brillen bei so großem Abstande des Objektes, daß $A_0 = 0$ gesetzt werden kann, D_0 den Korrektionswert darstellt. Bei der Kombination mit anderen Systemen ergeben sich für spezielle Werte von δ gewisse Vereinfachungen. So ist bei der Realisierung des Falles $\delta = 0$ und Einstellen auf großem Abstande die Hauptpunktrefraktion gleich D_0. Bei $\delta = \frac{1}{D}$ erhält man für dieselbe die Beziehung

$$A = -D_0^2\left(\frac{1}{D_0} + \frac{1}{A_0}\right) = -\frac{D_0^2}{L_0},$$

welche mit der allgemeinen Brennpunktsgleichung identisch ist, indem L_0 die im vorderen Brennpunkte des vorgeschalteten Systems gemessene reduzierte Konvergenz darstellt. Dieselbe Gleichung gilt somit auch, wenn $\delta = \frac{1}{D_0} + g$ ist, für den Korrektionswert der Ametropie. Bei unveränderlichem Werte von D_0 ist somit in diesen Fällen der Abstand des ersten Fokalpunktes des vorgeschalteten Systems vom Objekte der Refraktion bzw. dem Korrektionswerte der Ametropie proportional.

Die Bildgröße auf der Netzhaut ergibt sich aus den beiden allgemeingültigen Gleichungen

$$KB = A \qquad KD = L,$$

indem die scharfen Bilder in der Fovea centralis hinreichend klein sind, um die Vergrößerungskoeffizienten — welche tatsächlich nur Limeswerte angeben —, durch das Verhältnis der linearen Bild- und Objektgröße zu ersetzen. Stellt beim unbewaffneten Auge $\alpha\,\beta$ die lineare Größe von Objekt und Bild dar, und wird der Winkel αA bzw. αL als der reduzierte Hauptpunkt- bzw. Fokalpunktwinkel definiert und mit ω_h bzw. ω_f bezeichnet, so erhält man die Ausdrücke

$$\frac{\beta}{\omega_h} = b \qquad \frac{\beta}{\omega_f} = \frac{1}{D},$$

welche sich bei großem Abstande des Objektes besser eignen, da hierbei der Vergrößerungskoeffizient einen unendlich kleinen Wert annimmt. (Die reduzierten Winkel fallen in Luft mit den Winkeln selbst zusammen, werden aber hier doch eingeführt, damit die Formeln unmittelbar für das Sehen unter Wasser anwendbar seien.) Diese Formeln besagen, daß das Verhältnis der Netzhautbildgröße zum Fokalpunktwinkel nur von der Brechkraft des optischen Systems, das Verhältnis derselben zum Hauptpunktwinkel nur von der reduzierten Achsenlänge des Auges abhängig ist. Bei der Anwendung derselben hat man zu beachten, daß laut der Definition der Winkel dieselben bei reellem Objekte negativ sind, und daß das resultierende negative Vorzeichen von β eine umgekehrte Abbildung angibt. Der früher gebrauchte Gesichtswinkel, dessen Spitze im vorderen Knotenpunkt des Auges liegt, eignet sich weniger gut zu einer exakten Darstellung, wie überhaupt die Einführung der Knotenpunkte in die physiologische Optik deshalb als weniger glücklich bezeichnet werden muß, weil durch diesen Begriff nichts Tatsächliches, wohl aber viel Fiktives gewonnen wird.

Die Netzhautbildgröße in dem mit einem optischen System kombinierten Auge läßt sich somit durch die Einwirkung dieses Systems auf die Größe des Hauptpunkt- bzw. Fokalpunktwinkels d. h. durch die Untersuchung der Vergrößerung eines mit dem Auge kombinierten optischen Systems ermitteln. Hierbei hat man aber die Frage der absoluten Vergrößerung des Instrumentes streng von der der individuellen Vergrößerung zu trennen. Nach ersterer Vergrößerung wird die Leistungsfähigkeit des Instrumentes beurteilt, weshalb dieses Maß keinen vom Auge abhängigen Wert enthalten darf, während letztere Vergrößerung sich von der absoluten eben durch Berücksichtigung der

individuellen Verhältnisse des Auges unterscheidet. Wenn $\alpha_0 \beta_0$ Objekt- und Bildgröße in bezug auf das vorgeschaltete System darstellen, so hat man

$$\omega_h = \beta_0 A \qquad \beta_0 = \frac{\alpha_0 A_0}{B_0} \qquad B_0 = A_0 + D_0 = \frac{A}{1 + \delta A}$$

und erhält man durch Elimination von $A_0 B_0$:

$$-\frac{\omega_h}{\alpha_0} = D_0 - A(1 - \delta D_0).$$

Da nun optische Instrumente in Verbindung mit dem Auge das beste leisten, wenn ohne Anspannung der Akkommodation gesehen wird, und nur Anfänger, besonders jugendliche, bei der Anwendung derselben unnötigerweise akkommodieren, und da weiter die emmetropische Refraktion als die normale angesehen werden muß, so hat man zur Beurteilung der absoluten Vergrößerung eines Instrumentes in obenstehender Formel $A = 0$ zu setzen. Die absolute Vergrößerung wird somit durch die Brechkraft gemessen und würde deshalb am besten durch die Dioptrienzahl angegeben werden. Da aber die große Menge derjenigen, welche mit optischen Instrumenten arbeiten, den Begriff der Brechkraft nicht kennen, so wird, um eine dimensionslose Zahl zu erhalten, der Wert derselben konventionell mit dem „Abstande der deutlichen Sehweite" 0,25 m multipliziert. Die Brechkraft ist somit in Dioptrien viermal so groß als die konventionelle, die Vergrößerung angebende Zahl. Der Begriff der deutlichen Sehweite stammt aus der Zeit, wo man nicht daran dachte, daß das Auge auf unendliche Ferne eingestellt sein könnte, und ist eben deshalb sehr unglücklich, weil er heute noch den konstruierenden Optiker zu der Anschauung verleiten kann, daß bei der Anwendung des Instrumentes dieses ein Bild in dem entsprechenden Abstande entwerfen muß, welches dann vom Auge gesehen wird. Sogar ABBE[1] konnte, als er die Notwendigkeit des Begriffes der absoluten Vergrößerung eines Linsensystems einsah — er nannte dieselbe die vergrößernde Kraft — diesen Begriff nur für einen bestimmten Abstand des Instrumentes vom Auge deduzieren, weil die deutliche Sehweite zu dieser Zeit als etwas Reelles imponierte. Tatsächlich ist dieselbe nichts anderes als eine konventionelle Projektionsweite. Wird unter Anwendung dieser konventionellen Bezeichnung die Vergrößerungszahl eines Instrumentes mit n angegeben, so ist die Brechkraft desselben $4n$ Dioptrien, und ein emmetropisches Auge, welches bei erschlaffter Akkommodation dasselbe benutzt, erhält dabei ein Netzhautbild von einem gegebenen Objekte, welches n mal so groß ist, als es sein würde, wenn es das Objekt in einem Abstande von 25 cm vom vorderen Hauptpunkte des Auges betrachtete und die reduzierte Länge des Auges bei der nötigen Akkommodation unverändert bliebe.

Die absolute Vergrößerung der afokalen Instrumente — der Fernrohre — kann nicht durch die obenstehende Formel erhalten werden, ergibt sich aber unmittelbar daraus, daß in afokalen Instrumenten die Vergrößerungskoeffizienten überall dieselben Werte haben, weshalb auch ein solches Instrument durch zwei konjugierte Punkte und durch den Vergrößerungskoeffizienten in denselben definiert wird. Der reziproke Wert dieses Vergrößerungskoeffizienten ist der reduzierte anguläre Vergrößerungskoeffizient. Wird derselbe durch k repräsentiert, so gilt allgemein

[1] ERNST ABBE, Gesammelte Abhandlungen. I. Jena 1904. S. 445.

$$k = \frac{\omega_h}{\alpha_0 A_0},$$

wo die reduzierte Konvergenz A_0 in dem dem vorderen Hauptpunkte des Auges konjugierten Punkte gemessen wird. Bei emmetropischem Auge ist das Objekt unendlich entfernt, wenn das System afokal ist. Der Abstand der beiden letzterwähnten Punkte voneinander ist dann im Verhältnis zur Objektentfernung unendlich klein, und es gibt somit die Zahl k die absolute Vergrößerung des afokalen Systems an.

Die individuelle Vergrößerung ergibt sich für die verschiedenen Fälle durch Diskussion der allgemeinen Formel. Für eine gewöhnliche Lupe findet man, indem sowohl δ wie D_0 positive Werte haben, *daß $1 - \delta D_0$ positiv ist, wenn der hintere Brennpunkt der Lupe hinter dem vorderen Hauptpunkte des Auges* liegt. Die individuelle Vergrößerung ist dann bei hypermetropischer Refraktion kleiner als die absolute, bei myopischer Refraktion größer und wächst bei der Akkommodation, wenn die reduzierte Achsenlänge von derselben unbeeinflußt bleibt. Genau das umgekehrte Verhalten findet statt, wenn der hintere Brennpunkt der Lupe vor dem vorderen Hauptpunkte des Auges belegen ist, während beim Zusammenfallen der beiden Punkte die individuelle Vergrößerung für jede Refraktion gleich der absoluten ist. Setzt man

$$\varDelta = \delta - \frac{1}{D_0},$$

indem $\varDelta$ der reduzierte Abstand des vorderen Hauptpunktes des Auges vom hinteren Brennpunkte des vorgeschalteten optischen Systems ist, so erhält man die Gleichung

$$-\frac{\omega_h}{\alpha_0} = D_0 (1 + \varDelta A),$$

welche der Form nach mit der von ABBE[1] angegebenen zusammenfällt. Aus derselben ist ersichtlich, daß das oben von einer Lupe Gesagte auch für beliebige optische Systeme gültig ist — z. B. auch für zusammengesetzte Mikroskope, bei welchen D_0 negativ ist, δ bei schwacher Vergrößerung negativ sein kann — indem die angegebenen Unterschiede der Vergrößerung numerische Unterschiede darstellen.

Die durch diese Formel angegebene individuelle Vergrößerung ist somit ein Dioptrienwert, wie überhaupt das wissenschaftliche Maß der Vergrößerung ein Brechkraftmaß sein muß. Will man eine dimensionslose Zahl haben, so erhält man dieselbe entweder durch Multiplikation mit der konventionellen Projektionsweite oder mit dem Abstand, in welchem das unbewaffnete Auge den fraglichen Gegenstand am vorteilhaftesten sehen würde, wobei beide Abstände in Metern gemessen werden. Ersterer Zahlenwert würde keinen Nutzen bringen können, da die individuelle Vergrößerung nur diejenigen interessieren kann, denen der Begriff der Brechkraft bekannt ist; letztere Zahl gibt einen Ausdruck für den individuellen Nutzeffekt des vergrößernden Instrumentes ab. Da die akkommodative Verschiebung des hinteren Hauptpunktes zu gering ist, um in Rechnung gezogen zu werden, so liegt hierin der Grund, warum nur die Hauptpunktswinkel zur Messung der individuellen Vergrößerung eines Instrumentes

[1] a. a. O.

dienen können, sofern aus derselben der individuelle Nutzeffekt erhalten werden soll, weil dieser Wert einen Vergleich zwischen zwei verschiedenen Akkommodationszuständen enthält, und die Netzhautbildgröße bei beliebiger Akkommodation dem Hauptpunktswinkel proportional bleibt.

Das Wesentliche über die Vergrößerung eines dem Auge vorgeschalteten optischen Instrumentes kann somit dahin zusammengefaßt werden, daß der Ausdruck

$$sD_0(1 + \Delta A),$$

wenn s durch die Zahl 1 ersetzt wird, allgemein die in Dioptrien gemessene individuelle, und wenn $A = 0$ gesetzt wird, die absolute Vergrößerung eines optischen Instrumentes angibt, während, wenn für s die in Meter gemessene individuelle Sehweite mit positivem Vorzeichen eingeführt wird, die den individuellen Nutzeffekt angebende Zahl resultiert, und durch Einführung der konventionellen Projektionsweite auf dieselbe Weise für $A = 0$ die konventionelle, die Vergrößerung angebende Zahl erhalten wird. Macht man wiederum s gleich dem Abstande des ersten Hauptpunktes des Auges vom Objekt, so wird die Formel mit der von Eschricht und Panum[1] angegebenen, irrtümlicherweise auf die Knotenpunktswinkel bezogenen, identisch. Positives Vorzeichen gibt hierbei eine ohne scheinbare Umkehrung erfolgende Vergrößerung an. Zu bemerken ist ferner, daß die ganze Herleitung nur für sehr kleine Bilder gültig ist, somit sich nur auf die Bildgröße in dem ohne Bewegung des Blickes scharf gesehenen Felde bezieht. Hierbei besteht tatsächlich kein Unterschied gegenüber dem Ausdrucke von Abbe, in welchen die Tangente anstatt des Winkels eingeführt ist. Durch eine solche Prozedur wird aber der Gültigkeitsbereich nicht erweitert, denn Bild- und Objektgröße können, soweit es sich um die tatsächliche Abbildung handelt, nur dann an Stelle des Vergrößerungskoeffizienten eingeführt werden, wenn das Feld so klein ist, daß der Unterschied des Winkels und der Tangente desselben vernachlässigt werden kann. Die gegenteilige Annahme beruht auf der Fiktion, daß eine kollineare Abbildung nach der Vorstellung von Abbe vorhanden wäre.

Die eigentümliche Einrichtung des Sehorgans mit einem sehr kleinen, dafür aber beweglichen, scharfen Bildfelde bedingt es, daß bei der Abbildung ausgedehnter Objekte nicht die Größe des Netzhautbildes, sondern der Betrag der erforderlichen Winkelbewegung maßgebend ist. Zur Darstellung der Vergrößerung ausgedehnter Objekte muß deshalb an Stelle des Hauptpunktswinkels der Drehpunktswinkel eingeführt werden, der Winkel, unter welchem das im Instrumente entstandene Bild vom Drehpunkte aus gesehen wird, und es ist hierbei zu beachten, daß die Abbildungsgesetze erster Ordnung nur Annäherungswerte ergeben.

Wiederum ist es offenbar, daß die Hauptpunktswinkel nicht beim Vergleich der Netzhautbildgröße in verschiedenen Augen angewendet werden können, weil die reduzierte Achsenlänge bei verschiedenen Refraktionszuständen verschieden ist. Da aber die ophthalmometrischen Untersuchungen gelehrt haben, daß die vorkommenden Verschiedenheiten des optischen Systems des Auges nicht vom Refraktionszustande abhängig sind, so erhält man im Fokalpunktswinkel ein Maß der Netzhautbildgröße, welches von der Refraktion

[1] P. L. Panum, Die scheinbare Größe der gesehenen Objekte. Arch. f. Ophth. V, 1. 1859. S. 1.

— wenigstens bei der sogenannten Achsenametropie — unabhängig ist und deshalb diesem Zwecke am besten dient. Da die Brechkraft des optischen Systems des Auges gleich dem Verhältnis des Fokalpunktswinkels zur Netzhautbildgröße ist, so ist aber der Vergleich der Netzhautbildgröße in verschiedenen Augen nur dann ausführbar, wenn diese Brechkraft in beiden Augen einen und denselben Wert hat. Dies scheint für die große Mehrzahl der Augen annähernd der Fall zu sein, und die Fälle von Ametropie, welche keine Zeichen einer Abweichung hiervon aufweisen, werden mit dem Namen Achsenametropie bezeichnet, während der Begriff Krümmungsametropie die ohne Veränderung der Achsenlänge bestehenden Ametropieformen umfaßt. Daß aber bei achsenametropischen wie bei emmetropischen Augen abweichende Werte der Brechkraft vorkommen, geht schon aus den Untersuchungen von v. REUSS[1] hervor. Die durch den Fokalpunktswinkel gemessene Netzhautbildgröße ist somit nur ein wahrscheinlicher Wert, stellt aber vorläufig den besten dar.

Endlich ist, wie BJERKE[2] gefunden hat, beim Vergleich der Sehschärfe vor und nach der Entfernung der durchsichtigen Kristallinse der Winkel anzuwenden, dessen Spitze im scheinbaren Ort des optischen Zentrums der Linse liegt. (Die Anwendung des vereinfachten schematischen Auges ist bei der bei diesem Vergleich erreichbaren Genauigkeit vollkommen zulässig.) Stellt $\omega_{,}$ diesen Winkel dar, und ist $\varkappa$ der Vergrößerungskoeffizient in diesem optischen Zentrum sowie $A_{,} B_{,}$ die betreffende reduzierte Konvergenz, so ergibt sich

$$\omega_{,} = \beta_0 A_{,} = \varkappa \beta B_{,},$$

und da $\varkappa B_{,}$ bei der Linsenextraktion unverändert bleiben, so ist dasselbe mit dem Verhältnis $\frac{\omega_{,}}{\beta}$ der Fall.

Für die verschiedenen Winkel ist die Deduktion identisch dieselbe wie für die Hauptpunktswinkel, so daß die drei Ausdrücke

$$-\frac{\omega_n}{\alpha_0} = -\frac{A_n A_0}{B_0} = D_0 - A_n(1 - \delta_n D_0) = D_0(1 + \varDelta_n A_n)$$

allgemeingültig sind, wenn ω_n den Winkel darstellt, unter welchem vom Punkte n aus das vom vorgeschalteten optischen System entworfene Bild gesehen wird, A_n die in demselben Punkte gemessene Refraktion des Auges und $\delta_n \varDelta_n$ den Abstand desselben Punktes vom zweiten Hauptpunkte bzw. vom zweiten Brennpunkte des vorgeschalteten Systems bedeuten.

Hiermit sind die Mittel angegeben worden, welche die Untersuchung der durch die Ametropie sowie durch die Korrektion derselben bedingten Veränderungen der Sehschärfe ermöglichen. Die Sehschärfe ist teils ein Maß der Funktionstüchtigkeit der Netzhaut, und muß dann durch eine Methode gemessen werden, welche den Vergleich der Netzhautbildgröße in verschiedenen Augen gestattet, mit welcher somit der kleinste Fokalpunktswinkel bei der Fernpunktseinstellung ermittelt wird. Teils ist sie aber auch ein Maß der Funktionstüchtigkeit des individuellen Auges, welcher vom Akkommodationszustand unabhängig sein, mithin durch den kleinsten Hauptpunktswinkel gemessen werden muß. Ersteres Maß ist die absolute, letzteres die natürliche Sehschärfe,

[1] a. a. O.
[2] a. a. O.

welche somit direkt durch Bestimmung des kleinsten Hauptpunktswinkels am unbewaffneten Auge ermittelt wird. Da diese beiden Maße in einem und demselben Auge einem und demselben kleinsten Netzhautbilde entsprechen und den Distinktionswinkeln umgekehrt proportional sind, so erhält man aus der bei konstantem Werte von β gültigen Beziehung

$$\frac{\omega_h}{\omega_f} = \frac{B}{D}$$

die Formel

$$S = S_n \left(1 + \frac{A}{D}\right),$$

wo S die absolute, S_n die natürliche Sehschärfe darstellt. Führt man an Stelle der Refraktion des Auges den Korrektionswert im vorderen Brennpunkte desselben ein, so ergibt sich, wenn derselbe mit L bezeichnet wird, aus der Beziehung

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{L} - \frac{1}{D}$$

die Formel

$$S_n = S \left(1 - \frac{L}{D}\right).$$

Der Inhalt dieser beiden Formeln kann, wenn f den numerischen Wert der in Zentimeter gemessenen vorderen Brennweite des Auges darstellt, auf folgende Weise ausgedrückt werden. Man erhält die absolute Sehschärfe aus der natürlichen durch Zuzählen von f % für jede Dioptrie der Ametropie, und die natürliche aus der absoluten durch Abziehen von f % für jede Dioptrie des Korrektionswertes im vorderen Brennpunkte des Auges. Bei der Anwendung dieser Sätze hat man sich aber zu erinnern, daß bei Myopie sowohl der Korrektionswert wie die Ametropie negatives Vorzeichen haben und somit Zuzählen gleichbedeutend mit numerischem Abzählen ist und umgekehrt. Dieselben geben den Einfluß der Achsenametropie auf die natürliche Sehschärfe an. Bei reiner Krümmungsametropie ohne Veränderung der reduzierten Achsenlänge ist die natürliche Sehschärfe von der Ametropie unabhängig. Dagegen ist die absolute Sehschärfe wie bei Krümmungsanomalien im emmetropischen Auge bei gleicher Funktionstüchtigkeit der Netzhaut der Brechkraft des optischen Systems des Auges umgekehrt proportional.

Wird bei der Untersuchung der Sehschärfe unter Zuhilfenahme eines mit dem Auge kombinierten optischen Instrumentes die Spitze des zur Messung angewendeten Distinktionswinkels in den vorderen Hauptpunkt des vorgeschalteten Systems verlegt, und der durch diese Untersuchung bestimmte scheinbare Wert der Sehschärfe als relative Sehschärfe mit S_r bezeichnet, so ist das Verhältnis der relativen Sehschärfe zur absoluten bzw. zur natürlichen gleich $\frac{\omega_f}{\alpha_0 A_0}$ bzw. $\frac{\omega_h}{\alpha_0 A_0}$ und ergibt sich somit unmittelbar aus den oben deduzierten Formeln. Die Ausdrücke

$$S_r = S \cdot \frac{L}{B_0} = S_n \cdot \frac{A}{B_0}$$

ergeben

$$S_r = S\,(1 + \delta_f L) = S_n\,(1 + \delta A),$$

wo δ_f den Abstand des vorderen Brennpunktes des Auges vom hinteren Hauptpunkte des vorgeschalteten Systems bezeichnet. Bei der gewöhnlichen Untersuchung mit Brillen ist dieser Abstand so klein, daß er mit Rücksicht auf die bei der Ermittelung der Sehschärfe erreichbare Genauigkeit vernachlässigt werden kann, was auch vom Unterschiede des Wertes L von dem bei dieser Untersuchung erhaltenen Korrektionswerte gilt. Da nun bei $\delta_f = 0$ die relative Sehschärfe im akkommodationslosen Auge gleich der absoluten ist, so gilt mit einer für die praktischen Verhältnisse hinreichenden Genauigkeit, daß die absolute Sehschärfe unmittelbar erhalten wird, wenn die Untersuchung unter Anwendung der die Akkommodation aufhebenden Brille stattfindet, und daß sich die natürliche Sehschärfe zur absoluten wie der Korrektionswert zur Ametropie verhält. In welchem Abstande sich die Sehproben befinden, ist, wie aus dem Obenstehenden hervorgeht, vollkommen gleichgültig, aber je kürzer der Abstand, je stärker das angewendete Instrument ist, um so genauer muß die Forderung erfüllt werden, daß der Abstand vom vorderen Hauptpunkte des letzteren der Sehschärfenbestimmung zugrunde gelegt wird, und daß der hintere Hauptpunkt desselben mit dem vorderen Brennpunkte des Auges zusammenfällt.

Die Formeln lehren weiter, daß die relative Sehschärfe des akkommodationslosen Auges allgemein sich zur natürlichen Sehschärfe verhält wie die Ametropie zum Korrektionswert im hinteren Hauptpunkte des angewendeten Systems, welcher Wert somit nur bei großem Objektabstande mit der Brechkraft des letzteren identisch ist. Bei großem Objektabstande ist aber

$$(1 + \delta A)(1 - \delta D_0) = 1$$

und somit

$$S_n = S_r (1 - \delta D_0),$$

woraus folgt, daß, wenn δ in Zentimetern gemessen wird, die natürliche Sehschärfe allgemein aus der bei großem Objektabstande ermittelten relativen Sehschärfe durch Abziehen von δ % für jede Dioptrie des angewendeten Glases erhalten wird, wobei es gleichgültig ist, ob das Auge akkommodiert oder nicht.

Wird anstatt des im Werte der natürlichen Sehschärfe enthaltenen Winkels ω_h der Winkel $\omega_,$ angewendet, dessen Spitze im scheinbaren Ort des optischen Zentrums der Kristallinse liegt, so erhält man durch Anwendung dieser Formel das Verhältnis der relativen Sehschärfe nach der Extraktion der durchsichtigen Kristallinse zu der vor der Extraktion gefundenen:

$$\frac{1 - \delta_, D_,}{1 - \delta_, D_{,,}},$$

wo $\delta_,$ den Abstand des genannten scheinbaren Ortes vom hinteren Hauptpunkte des vorgeschalteten Systems, $D_, D_{,,}$ die Brechkraft der vor bzw. nach der Extraktion angewendeten Linse darstellt. Zu demselben Resulate gelangt man, obwohl auf etwas umständlicherem Wege, durch den Vergleich der absoluten Sehschärfe, welche sich im linsenlosen Auge zu der im linsenhaltigen wie $D : D_h$ verhält.

Die Kombination des Auges mit einem optischen Instrumente, dessen hinterer Hauptpunkt mit dem vorderen Brennpunkte desselben zusammenfällt,

gibt das Mittel ab zur Berechnung der durch die Achsenametropie bedingten Veränderung der Bulbuslänge. Wie die oben S. 308 angegebenen Formeln lehren, ist dabei die Brechkraft des Totalsystems gleich der Brechkraft des optischen Systems des Auges, und der vordere Brennpunkt des Totalsystems liegt im vorderen Hauptpunkte des vorgeschalteten Systems. Da die Brennweiten durch die Kombination unbeeinflußt bleiben, so ist die reduzierte Verschiebung des hinteren Brennpunktes gleich

$$H_t' = -\frac{D_0}{D^2}$$

und, wenn D_0 der Korrektionswert ist, fällt der hintere Brennpunkt auf die Netzhaut. Unter Zugrundelegung des exakten bzw. vereinfachten schematischen Auges ergibt sich, daß die Länge des achsenametropischen Auges um 0,389 bzw. 0,374 mm für jede Dioptrie des Korrektionswertes von der Länge des emmetropischen abweicht. Zu demselben Resultate gelangt man durch Anwendung der allgemeinen Brennpunktsgleichung.

Wird das Auge mit einem Instrumente kombiniert, dessen hinterer Brennpunkt mit dem vorderen Haupt- oder Brennpunkte desselben zusammenfällt, so erhält man durch Messung des Winkels $\alpha_0 D_0$ im ersteren Falle die natürliche, im letzteren bei akkommodationslosem Auge die absolute Sehschärfe, wie unmittelbar aus der Formel

$$\omega_n = -\alpha_0 D_0 (1 + \varDelta_n A_n)$$

hervorgeht, indem für beide Fälle $\varDelta = 0$ ist. Da, wie oben bewiesen wurde, im ersteren Falle die Refraktion, im letzteren der Korrektionswert dem Abstande des vorderen Brennpunktes des vorgeschalteten Systems vom Objekte proportional ist, so wurden diese Kombinationen mehrfach Optometerkonstruktionen zugrunde gelegt.

Zur Untersuchung der Refraktion braucht man außer der Kombination mit einem optischen Instrumente noch einen Indikator, ein Mittel, welches angibt, ob die Abbildung im Auge scharf ist oder nicht. Das souveräne Mittel bleibt immer noch die Bestimmung der Sehschärfe, welche eine objektive Kontrolle seitens des Untersuchers ermöglicht. Einen anderen Indikator für das Vorhandensein von Zerstreuungskreisen würde die Zerlegung der Pupille in Teile abgeben, welche neben oder nacheinander für die optische Projektion gebraucht werden, wenn nicht die Aberrationsverhältnisse des normalen Auges die Genauigkeit der Resultate beeinträchtigte. Hierher gehören die auf die Versuche von Scheiner und Mile basierten Indikatoren, somit auch die unter dem Namen Kineskopie von Holth[1] neuerdings empfohlene Methode. Wäre das Verhältnis der Pupillengröße zur Aberration im Auge ein solches, daß die Gesetze erster Ordnung angewendet werden könnten, so würde die Theorie dieser Untersuchung in dem Werte des linearen Projektionskoeffizienten (S. 250) enthalten sein, indem es sich um eine optische Projektion des vor das Auge gehaltenen Loches auf die Netzhaut handelt. In der Formel

$$C = \varkappa (1 - \delta' \mathfrak{B})$$

ist dann $\varkappa$ der Vergrößerungskoeffizient in dem dem Loche in bezug auf das optische System des Auges konjugierten Punkte, δ' der reduzierte Abstand

[1] S. Holth, *Nouveau procédé pour déterminer la réfraction oculaire. Ann. d'Oculistique.* CXXXI. 1904. S. 1.

der Netzhaut von diesem Punkte und $\mathfrak{B}$ die in demselben gemessene reduzierte Konvergenz des Objektstrahlenbündels. Ein positives Vorzeichen von C bedeutet hier eine gleichsinnige optische Projektion, somit eine gekreuzte monokulare Diplopie bzw. eine entgegengesetzte Scheinbewegung bei dem SCHEINERschen bzw. MILEschen Versuche. Setzt man

$$\varDelta' = \frac{1}{\mathfrak{B}} - \delta',$$

wobei $\varDelta'$ den reduzierten Abstand des dem Objektpunkte entsprechenden Bildpunktes von der Netzhaut darstellt, so kann, wenn K der Vergrößerungskoeffizient in diesem Bildpunkte und $\mathfrak{A}$ die im Orte des Loches gemessene Konvergenz des Objektstrahlenbündels ist, die Formel in folgender Form geschrieben werden:

$$C = \varkappa \mathfrak{B} \varDelta' = \frac{\mathfrak{A} \varDelta'}{K},$$

aus welcher hervorgeht, daß dem bei einer Verschiebung des Loches auf der Achse des Auges im vorderen Brennpunkte desselben stattfindenden Vorzeichenwechsel von $\varkappa$ kein Vorzeichenwechsel von C entspricht.

Dieselben Formeln ergeben allgemein die Größe der Zerstreuungskreise, soweit sich diese aus den Gesetzen erster Ordnung ermitteln läßt, was aber nur bei kleiner Pupille und großem Einstellungsfehler dem tatsächlichen Verhalten annähernd entspricht. Es ist dann $\mathfrak{A}\,\mathfrak{B}$ die reduzierte Konvergenz des Objektstrahlenbündels, vor der Brechung in der Eintrittspupille bzw. nach der Brechung in der Austrittspupille gemessen, worunter der scheinbare Ort der Pupille bzw. der in bezug auf das optische System des Auges diesem Orte konjugierte Punkt verstanden wird, und es stellt $\varkappa$ den diesen Punkten zugehörigen Vergrößerungskoeffizienten dar. Wenn $\mathfrak{R}$ die in der Eintrittspupille gemessene (statische oder dynamische) Refraktion des Auges ist, so hat man

$$\frac{\varkappa^2}{\delta'} = \varkappa D + \mathfrak{R} \qquad \varkappa^2 \mathfrak{B} = \varkappa D + \mathfrak{A} \qquad \frac{\varkappa K}{\delta'} = \mathfrak{R} \qquad KD = L,$$

folglich auch

$$\varkappa^2 \left(\frac{1}{\delta'} - \mathfrak{B}\right) = \mathfrak{R} - \mathfrak{A} \qquad \frac{\delta' \mathfrak{R}}{\varkappa} = \frac{L}{D}$$

und somit

$$C = \frac{\delta'(\mathfrak{R} - \mathfrak{A})}{\varkappa} = \frac{L}{D}\left(1 - \frac{\mathfrak{A}}{\mathfrak{R}}\right),$$

wo C das Verhältnis des Durchmessers des Zerstreuungskreises zum Durchmesser der Eintrittspupille und δ' den reduzierten Abstand der Netzhaut von der Austrittspupille darstellt. Wird in dieser Formel der Abstand der Eintrittspupille vom vorderen Hauptpunkte des Auges und der Größenunterschied derselben von der Pupillenöffnung vernachlässigt, so wird $\varkappa = 1$ und stellt δ' die reduzierte Achsenlänge dar. Die durch diese Approximation resultierende Formel ist für den allgemeinen Fall von SALZMANN[1], für den Fall $\mathfrak{A} = 0$ von

[1] M. SALZMANN, Das Sehen in Zerstreuungskreisen. Arch. f. Ophth. XXXIX, 2. 1893. S. 83.

NAGEL[1] deduziert worden. Daß letztere Formel exakt gültig ist, hat GLEICHEN[2] unter Anwendung des Vergrößerungskoeffizienten in der Pupille bewiesen.

Zur Untersuchung des Sehens in Zerstreuungskreisen genügen nicht die Gesetze erster Ordnung der Abbildung und optischen Projektion. Denn bei mittlerer Pupillengröße bedingt die Aberration des Auges, daß Einstellungsfehler von mehreren Dioptrien nicht genügen, um Schnittlinien der kaustischen Fläche mit der Netzhaut auszuschließen, welche eine ein- oder mehrfache Abbildung von Linien bedingen, während schon bei der schärfsten Einstellung Zerstreuungskreise von bedeutender Größe vorhanden sind. Und bei kleiner Pupille spielen wiederum die Erscheinungen der Diffraktion ein. Ersterer Umstand macht die exakte Untersuchung der Tiefe der Abbildung im Auge, der Akkommodationslinie CZERMAKs, zu einem sehr verwickelten mathematischen Problem und erklärt den von SALZMANN[3] betonten Einfluß der Übung, welche in der Deutung der durch andere Querschnitte der kaustischen Fläche entstehenden Abbildungsfiguren besteht. Diese Übung ist wiederum von besonderer Bedeutung bei der Erklärung der eigentümlichen Fähigkeit zu lesen bei starker unkorrigierter Hypermetropie, für welche sonst mit Vorliebe das Verhältnis der Größe des Zerstreuungskreises zur Größe des unscharfen Bildes hinzugezogen wird.

Der lineare Projektionskoeffizient C_0 bei der optischen Projektion unscharf gesehener Gegenstände auf die Netzhaut ergibt sich allgemein daraus, daß in der Pupille der reduzierte anguläre Vergrößerungskoeffizient gleich dem reziproken Werte des linearen Vergrößerungskoeffizienten ist:

$$C_0 = \frac{\delta' \mathfrak{A}}{\varkappa}.$$

Wenn das Objekt reell ist und dem Auge zu nahe steht, um scharf gesehen werden zu können, so ist sowohl C_0 wie $\mathfrak{A}$ negativ, während C und $\mathfrak{R} - \mathfrak{A}$ positive Werte haben. Für diesen Fall gilt somit

$$Q = -\frac{C}{C_0} \qquad O = -\mathfrak{A},$$

wenn $Q\,O$ die betreffenden numerischen Werte angeben. Die allgemein gültige Formel

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\mathfrak{R} - \mathfrak{A}}{\mathfrak{A}}$$

erhält dann die Gestalt

$$Q = 1 + \frac{\mathfrak{R}}{O}.$$

Ist p der Durchmesser der Eintrittspupille, o die lineare Objektgröße, so ist $\frac{pQ}{o}$ das Verhältnis des Durchmessers der Zerstreungskreise zur linearen Größe des auf die Netzhaut projizierten Bildes. Da sich nun unmittelbar aus

[1] A. NAGEL, Die Anomalien der Refraktion und Akkommodation des Auges. Handb. d. ges. Augenheilk. von GRAEFE und SAEMISCH. Bd. VI. Kap. X. 1880. S. 457.

[2] A. GLEICHEN, Einführung in die medizinische Optik. Leipzig 1904. S. 117. Und: Über die Zerstreuungsfiguren im menschlichen Auge. Arch. f. Optik. I. 1908. S. 211.

[3] M. SALZMANN, Das Sehen in Zerstreuungkreisen. Arch. f. Ophth. XL, 5. 1894. S. 102.

der Formel ergibt, daß bei der Zunahme von O der Wert von Q abnimmt, wenn $\mathfrak{R}$ einen positiven Wert hat, im entgegengesetzten Falle aber zunimmt, so ist dies also damit gleichbedeutend, daß bei Annäherung des Objektes die Bildgröße bei hypermetropischer Refraktion schneller wächst als die Größe der Zerstreuungskreise, während bei Myopie das umgekehrte Verhalten stattfindet. Hierdurch hat man erklären wollen, daß ein Hypermetrop von beispielsweise 8 Dioptrien feinen Druck im Abstande von 5 cm mit unbewaffnetem Auge lesen kann. Daß aber bei Hypermetropie die Verhältnisse tatsächlich ungünstiger liegen als bei den anderen Refraktionszuständen, ergibt sich unmittelbar daraus, daß der Wert von Q bei positiver Refraktion auch bei größter Annäherung des Objektes größer als die Einheit ist, während bei Emmetropie Q stets den Wert 1 hat und bei Myopie dieser Wert nicht erreicht wird, solange das Objekt dem Auge zu nahe steht, um scharf gesehen zu werden. Der diesbezügliche Effekt des Refraktionszustandes wird am besten dadurch illustriert, daß man ein Objekt wählt, dessen lineare Größe gleich dem Durchmesser der Eintrittspupille ist. Es stellt dann Q das Verhältnis des Durchmessers der Zerstreuungskreise zur Bildgröße dar, und das Vorzeichen des Wertes $Q - 1$ gibt an, ob die den Endpunkten des Objektes entsprechenden Zerstreuungskreise sich überdecken oder nicht. Man ersieht, daß dies bei Hypermetropie der Fall ist, während bei Emmetropie die Zerstreuungskreise sich berühren und bei Myopie ein Zwischenraum vorhanden ist. Es ist somit einleuchtend, daß die emmetropische und in noch höherem Grade die myopische Refraktion für die beschriebene Art des Lesens günstiger ist als die hypermetropische, und daß der Hypermetrop das beste Resultat erhält, wenn er auf seine Hypermetropie verzichtet und möglichst stark akkommodiert. Das ist nun eben, was er tut, wohl nicht so sehr um durch Änderung der optischen Einstellung als durch die begleitende Pupillenverengerung die Größe der Zerstreuungskreise zu vermindern. Emmetropen und Myopen würden somit auf diese Weise noch besser als die Hypermetropen lesen können, wenn sie dieselbe Pupillenverengerung erzielen könnten wie die unkorrigierten Hypermetropen und, wie diese, von Kindheit an die Methode geübt hätten.

Bei der betreffenden Pupillengröße darf aber die Güte des durch die optische Projektion entstandenen Bildes nicht nach der Größe der Zerstreuungskreise beurteilt werden, weil die Diffraktion am Rande der Pupille die Lichtverteilung innerhalb derselben beeinflußt[1]. Man kann sich unter Anwendung eines stenopäischen Loches sehr leicht hiervon überzeugen. Macht man sich durch Vorsetzen von starken Konvex- oder Konkavgläsern ametrop, und sieht man dabei durch ein zwischen Glas und Auge vor dem Zentrum der Pupille gehaltenes Loch, so sieht man schon bei 2 mm, noch deutlicher aber bei 1 mm Durchmesser des Loches eine Lichtkonzentration am Rande des Zerstreuungskreises, den man von einem kleinen leuchtenden Punkt erhält. Daß dies eine Diffraktionserscheinung ist und nicht etwa von der Aberration der Gläser herrührt, folgt teilt daraus, daß das Phänomen bei größerer Blende ausbleibt, teils daraus, daß die Aberration gerade das entgegengesetzte Verhalten bedingen müßte. Da es sich um die Diffraktion handelt, kann der Schluß nicht gezogen werden, daß der einem schwarzen Punkte auf weißer Fläche entsprechende

[1] Eine Diskussion der in geometrisch optischer Hinsicht interessanten Beziehung $C + C_0 = K$ würde deshalb keinen praktischen Nutzen bringen.

Schattenkegel sich auf analoge Weise verhalte wie der Lichtkegel beim leuchtenden Punkte. Die exakte Untersuchung der Einwirkung der Diffraktion in einem solchen Falle würde eine sehr schwierige mathematische Aufgabe sein. Es ist aber einleuchtend, daß durch dieselbe Licht im Gebiete des Schattenkegels hineingeführt, somit auch die Größe der Schattenkreise und die Schattenverteilung in denselben beeinflußt wird.

Da die scheinbare Objektgröße bei der optischen Projektion im Auge durch die Zerstreuungskreise vermehrt wird, so ist es verständlich, daß die Vergrößerung durch die Konvexgläser bei der Korrektion der hochgradigen Hypermetropie weniger auffällig ist als die Verkleinerung durch die Konkavgläser bei der Korrektion der hochgradigen Myopie und daß in den letzteren Fällen, wenn bei schlechter Sehschärfe kleine Netzhautbilder überhaupt nicht verwertet werden können, die Korrektion weniger Nutzen bringt.

Eine Methode zur Untersuchung der Zerstreuungskreise, welche von der Aberration und der Diffraktion relativ unbeeinflußt bleibt, ist die chromatische Zerlegung derselben. Da in der Formel S. 317 $\varDelta'$ für verschiedene Farben verschiedene Werte hat, so muß bei der scharfen Einstellung für eine kurzwellige Farbe ein Zerstreuungskreis der langwelligen entstehen und umgekehrt, und diese Zerstreuungskreise müssen um so deutlicher sichtbar sein, je mehr das Licht einer binären Mischung aus kurzwelligem mit langwelligem Lichte gleichkommt. Eine in dieser Beziehung praktisch sehr anwendbare Lichtmischung liefert ein Kobaltglas von hinreichend gesättigter Farbe mit dem Lichte einer gewöhnlichen Kerzenflamme. Die Beobachtung der farbigen Säume eines vor der Lichtquelle befestigten Loches repräsentiert auch einen sehr guten Indikator der Abbildung, wie S. 119 von Helmholtz angegeben worden ist.

Von den Methoden zur Untersuchung der Refraktion bleibt die Dondersssche vorläufig allen anderen überlegen. Dieselbe besteht in der Kombination des Auges mit verschiedenen Gläsern unter Anwendung der Sehschärfebestimmung bei großem Objektabstande als Indikator der Einstellung. Die Untersuchung ergibt somit den Korrektionswert und die absolute Sehschärfe, indem das stärkste positive bzw. schwächste negative Glas gesucht wird, mit welchem das Auge seine maximale Sehschärfe erreicht. Die Vorteile dieser Methode bestehen in der durch die Sehschärfebestimmung ermöglichten objektiven Kontrolle und in der Erschlaffung der Akkommodation, welche erfahrungsgemäß mit Brillen und bei großem Objektabstande den meisten Menschen leichter ist als wenn sie in ein Instrument hineinblicken sollen. Auf die Details dieser Untersuchung oder auf die übrigen optometrischen Methoden einzugehen, würde hier zu weit führen. Es soll nur daran erinnert werden, daß, ebenso wie der große Objektabstand die Erschlaffung der Akkommodation begünstigt, auf dieselbe Weise ein kurzer Objektabstand dieselbe stimuliert. Wenn deshalb die Dondersssche Methode zur Bestimmung des Fernpunktes die geeignetste ist, so wird die zur Ermittelung der Akkommodationsbreite erforderliche Bestimmung des Nahepunktes am besten durch direkte Messung ausgeführt, nachdem derselbe durch Vorsetzen einer passend gewählten Brille in einen für die Messung geeigneten Abstand verlegt worden ist.

Die physiologische Refraktion des Auges ist bei der Geburt hypermetropisch, wie zahlreiche Untersuchungen bewiesen haben. Die gegenteilige

Angabe von Jaeger[1] beruht, wie Hess[2] und Elschnig[3] nachgewiesen haben, darauf, daß er ohne künstliche Pupillenerweiterung untersuchte, und daß die Neugeborenen durch Akkommodation ihre Refraktion wenigstens zeitweise wesentlich vermindern. Die angeborene Hypermetropie, welche nach den Untersuchungen Straubs[4] im Mittel 2 Dioptrien beträgt, nimmt schon in der Kindheit ab, so daß der normale Refraktionszustand vom Schulalter ab emmetropisch oder sehr schwach hypermetropisch ist, um sich von der fünften Lebensdekade ab dem der Neugeborenen wieder zu nähern und denselben im hohen Greisenalter approximativ zu erreichen. Straub ist der Meinung, daß der größte Teil der Hypermetropie während des ganzen Lebens bestehen bliebe und durch einen Tonus des Ziliarmuskels verdeckt wäre, aber das Material, auf welches diese Ansicht gestützt wird, dürfte nicht hinreichend sein, um die Richtigkeit derselben zu beweisen.

Die im ersten Kindesalter erfolgende Veränderung der Refraktion ist die Resultante der beim Wachstum eintretenden Veränderung der Bulbuslänge und des optischen Systems. Was letzteres betrifft, so ist der Krümmungsradius der Hornhaut zwar beim Neugeborenen etwas kleiner als beim Erwachsenen — die Angaben bewegen sich um 7,0 mm herum — aber den größten Unterschied zeigt die Linse, deren Form sich der kugeligen nähert, und welche demgemäß einen sehr hohen Totalindex besitzen muß. Die Erreichung der angenähert emmetropischen Refraktion in der überwiegenden Mehrzahl der Augen setzt offenbar einen beim Wachstum wirkenden regulierenden Mechanismus voraus, welcher wohl nur darin gesucht werden kann, daß bei der Hypermetropie Akkommodationsspannungen von viel längerer Dauer erforderlich sind als bei anderen Refraktionszuständen, und daß in der kontinuierlichen Akkommodation ein Moment vorhanden ist, welches beim Wachstum des Auges refraktionsvermindernd wirkt. Durch die bei der Kontraktion des Ziliarmuskels erfolgte Spannung der Chorioidea ist jedenfalls ein statisches Moment gegeben, welches auf das Wachstum der Bulbusachse einwirken könnte, und durch die bei der Akkommodation eintretende Formveränderung der Linse kann ohne Zweifel die Anordnung der Isoindizialflächen und damit auch der Totalindex beim Wachstum beeinflußt werden. Daß auch andere noch unbekannte regulierende Momente vorhanden sein können, liegt auf der Hand.

Die im Greisenalter wiederauftretende Hypermetropie findet ihre Erklärung teils in der durch die vermehrte Resistenz der Bulbushüllen und den verminderten Druck der umgebenden Gewebe bedingten Formveränderung, deren Existenz durch die ophthalmometrische Untersuchung der Hornhaut bewiesen ist, teils aber auch in den senilen Veränderungen der Linse. Ob ersteres Moment eine meßbare Vergrößerung des Hornhautradius bewirkt, dürfte wohl, wie oben betont wurde, noch nicht mit Sicherheit bewiesen sein, daß es aber eine Verkürzung der Augenachse um einige Zehntel Millimeter zu bewirken

[1] Ed. v. Jaeger, Über die Einstellungen des dioptrischen Apparates im menschlichen Auge. Wien 1861.

[2] a. a. O. S. 284.

[3] Bemerkungen über die Refraktion der Neugeborenen. Zeitschr. f. Augenheilk. XI. 1904. S. 10.

[4] M. Straub, Die normale Refraktion des menschlichen Auges. Zeitschr. f. Physiol. d. Sinnesorg. XXV. 1901. S. 78. — Über die Ätiologie der Brechungsanomalien des Auges und den Ursprung der Emmetropie. Arch. f. Ophth. LXX. 1. 1909. S. 130.

imstande ist, dürfte wohl kaum einem Zweifel unterliegen. Letzteres Moment kann wiederum nicht nur durch Erhöhung des Kortikalindex, sondern auch durch veränderte Form der Isoindizialflächen ein Herabdrücken des Totalindex bewirken. Endlich ist die Einwirkung der senilen Pupillenverengerung in Rechnung zu ziehen, welche bei normaler Aberration eine, obwohl geringe Erhöhung der Refraktion bewirken muß, da ein bei mittlerer Pupillengröße emmetropisches Auge bei unendlich kleiner Pupille eine Hypermetropie von 1 D. aufweisen müßte.

Die im Endstadium senile Veränderung der Linse beginnt in der frühesten Kindheit, was damit im Zusammenhang steht, daß die Linse eine geschlossene Epithelbildung darstellt, wo keine Abfuhr möglich ist, wohl aber, wie aus den Untersuchungen von Priestley Smith[1] hervorgeht, während des ganzen Lebens eine konstante Zufuhr stattfindet. Objektiv zeigt sich diese Veränderung am lebenden Auge durch eine stetige, bei geeigneter Untersuchung ohne Schwierigkeit wahrnehmbare Zunahme der Fluoreszenz,[2] dann durch das Auftreten der Hessschen Kernbildchen, welche eine Diskontinuitätsfläche in der Indexvariation beweist, die, wenn man so will, die Grenzfläche zwischen einem Kerne und einer Kortikalschicht ausmacht, und endlich durch eine zunehmende diffuse Reflexion des Lichtes und eine im höheren Alter immer gelber werdende Farbe des vom Kern reflektierten Lichtes, sowie manchmal durch eine Verdoppelung des in der hinteren Linsenfläche entstehenden Purkinjeschen Bildes, wenn es in einer den Kernäquator streifenden Richtung untersucht wird. An der toten Linse findet man dementsprechend neben der stetigen Größenzunahme eine fortschreitende Sklerosierung der zentralen Partien und Differenzierung des Kernes. Funktionell zeigt sich diese Veränderung in einer fortschreitenden Abnahme der Akkommodationsbreite, welche von dem Zeitpunkte an konstatiert werden kann, wo diese anfängt gemessen werden zu können. Die grundlegenden Untersuchungen von Donders[3] haben hierzu folgende Zahlen ergeben:

Lebensalter in Jahren	Akkommodationsbreite in Dioptrien
10	14
15	12
20	10
25	8,5
30	7
35	5,5
40	4,5
45	3,5
50	2,5
55	1,75
60	1
65	0,5
70	0,25

---

[1] *The growth of the crystalline lens. Brit. Med. Journ.* I. 1883. S. 112.
[2] A. Gullstrand, Die Farbe der Macula centralis retinae. Arch. f. Ophth. LXII, 1. S. 43.
[3] a. a. O.

Bei der Verwertung dieser Zahlen hat man sich aber daran zu erinnern, daß die Untersuchung die Grenze der Wahrnehmbarkeit kleinster Zerstreuungskreise angibt, das erhaltene Maß somit von der Tiefe der Abbildung abhängig ist und von der Pupillengröße beeinflußt wird. Es dürfte deshalb die senile Abnahme der Akkommodationsbreite etwas rascher fortschreiten, als die Tabelle angibt, und man kann dieselbe für je 5 Jahre nach dem vierzigsten mit hinreichender Genauigkeit auf 1 D. schätzen.

Unter Presbyopie wird das Hinausrücken des Nahepunktes jenseits der konventionellen deutlichen Sehweite verstanden. Hierbei ist das ältere Maß dieser Sehweite, 22 cm, gemeint, während bei der Berechnung der Vergrößerung das von der ABBEschen Schule eingeführte neuere Maß, 25 cm, angewendet wird. Für ein emmetropisches Auge beginnt somit die Presbyopie nach dem vierzigsten Jahre. In praktischer Hinsicht spielt aber die habituelle Pupillengröße hierbei eine wichtige Rolle. Dieselbe wird sehr häufig durch eine Krankheit, welche den Allgemeinzustand herabgesetzt hat, oder durch neurasthenische Zustände beeinflußt, und so entsteht durch Vergrößerung der Pupille das jedem Ophthalmologen bekannte Bild einer plötzlich entstandenen Presbyopie bei emmetropischen Fünfzigjährigen. Dem Begriffe der Presbyopie entsprechend wird der korrigierte Ametrop allgemein in demselben Alter presbyopisch wie der Emmetrop, während der unkorrigierte Hypermetrop früher, der unkorrigierte Myop später oder gar nicht presbyopisch wird.

Auf die Anomalien der Refraktion hier näher einzugehen, würde bei dem jetzigen Stande der Wissenschaft viel zu weit führen. Die ungeheure Entwicklung derselben seit dem Erscheinen der ersten Auflage dieses Handbuches tritt erst recht klar zutage, wenn man sich erinnert, daß die Trennung der Hypermetropie von der Presbyopie dort erst in einem Nachtrage erwähnt wurde. Der grundlegenden Arbeit von DONDERS[1] schließen sich zusammenfassende Darstellungen von MAUTHNER[2], NAGEL[3] und LANDOLT[4] an, während HESS[5] unter Anwendung des exakten Dioptriebegriffes das Gebiet wesentlich umgestaltet und die Darstellung auf die den Anforderungen der Zeit entsprechende Höhe gebracht hat.

Die Hypermetropie ist in den typischen Fällen angeboren und gehört in das Gebiet der Achsenametropie. In den höheren Graden ist dieselbe als eine Hemmungsbildung aufzufassen und öfters von anderen Mißbildungen — Astigmatismus, Asymmetrie, abnorme Gestalt der Sehnervenpapille u. a. m. — begleitet, in den niedrigeren dürfte sie als Wachstumsanomalie erklärt werden müssen. Von den atypischen Hypermetropieformen ist die nach Extraktion der Linse eintretende — welche das auffallendste Beispiel einer Krümmungsametropie darstellt — die bei weitem häufigste.

---

[1] a. a. O. Deutsch von O. BECKER: Die Anomalien der Refraktion und Akkommodation des Auges. Wien 1866.

[2] a. a. O. Vorlesungen über die optischen Fehler des Auges. Wien 1876.

[3] a. a. O. Die Anomalien der Refraktion und Akkommodation des Auges. In Handb. d. ges. Augenheilk. von GRAEFE und SAEMISCH. Bd. VI. X. Kap. 1880.

[4] E. LANDOLT, *La réfraction et l'accommodation de l'oeil.* In *Traité compl. d'ophth.* par WECKER et LANDOLT. T. III. Paris 1887.

[5] a. a. O. Die Refraktion und Akkommodation des menschlichen Auges und ihre Anomalien. Leipzig 1902, und im Handb. von GRAEFE und SAEMISCH. 2. Aufl. II. T. XII. Kap.

Die typische Myopie ist hingegen eine erworbene Anomalie, gehört aber wie die typische Hypermetropie zu den Achsenametropien. Die niedrigsten Grade dürften, wie bei der Hypermetropie, einfach eine Wachstumsanomalie darstellen, während die höchsten Grade zweifellos eine Krankheit repräsentieren. Wie es gewissermaßen der Willkür überlassen ist, wo die Grenze zwischen einer Wachstumsanomalie und einer Krankheit gezogen werden soll, so ist auch die Auffassung der Ophthalmologen von der Stellung der häufigen mittleren Grade noch nicht einstimmig geworden. Als ursächliche Momente kennt man eine angeborene oder durch Schwächezustände erworbene Disposition und die Einwirkung angestrengter Nahearbeit. Die Disposition wird meistens auf eine zu große Nachgiebigkeit der Bulbushüllen zurückgeführt, dürfte aber auch in den statischen Verhältnissen beim Wachstum zum Ausdruck kommen können, wie aus der Prädisposition der Dolichocephalen hervorgeht. Über die Art und Weise, in welcher die angestrengte Nahearbeit schädlich wirkt, sind die Meinungen im Laufe der Zeit weit auseinander gegangen. Die Ansicht, daß die Akkommodation eine Erhöhung des intraokularen Druckes bewirke, welcher die Ophthalmologen der Jetztzeit das Vorurteil der Laien und mancher Fachleute gegen die volle Korrektion der Myopie verdanken, ist durch exakte Untersuchungen widerlegt worden. Auch der Gedanke, daß die bei der Nahearbeit nötige Konvergenz die Schuld trage, dürfte in den Fällen, wo die Konvergenz normal ist und ohne abnorme Anspannung sämtlicher äußerer Augenmuskeln erfolgt, nicht mehr aufrecht erhalten werden können. Dagegen ist es einleuchtend, daß eine angestrengte Fixation unter Anspannung sämtlicher äußerer Augenmuskeln ebenso wie das habituelle krampfähnliche Zukneifen der Lider bei offener Augenspalte verlängernd auf die Augenachse wirken kann. Und wenn in der kontinuierlichen Akkommodation des kindlichen hypermetropischen Auges der Regulierungsprozeß liegt, welcher die emmetropische Refraktion hervorbringt, so ist es auch wahrscheinlich, daß eine übermäßig angestrengte Akkommodation myopiefördernd wirkt. Jedenfalls bezeugt die klinische Erfahrung ein relativ häufiges Zusammentreffen von Myopie und solchen, schon in der Kindheit vorhanden gewesenen Zuständen, welche wegen schlechter Sehschärfe eine übermäßige Annäherung an die Arbeit veranlassen, wie Schichtstar, Hornhautflecke, Astigmatismus, abnorme Dezentration, Fälle, in welchen die Akkommodation durch die begleitende Pupillenverengerung das Sehen unverhältnismäßig verbessert, und deshalb auch leicht übermäßig in Anspruch genommen wird.

Wenn aber über die Art der Einwirkung der Nahearbeit die Meinungen noch auseinander gehen, so ist die Notwendigkeit der Vorbeugung gegen unnötig angestrengte Nahearbeit ein anerkanntes Kampfmittel gegen die Verbreitung der Myopie, welches u. a. in den Maßregeln der modernen Schulhygiene Anwendung findet. Den glänzenden Sieg, den Schweden mit diesem Mittel gewonnen hat, bezeugt die Zusammenstellung von WIDMARK.[1] In der Aufgebung des gotischen Druckes und der sog. deutschen Handschrift steht Deutschland noch ein Mittel zu Gebote, mit welchem sein Ruf als Myopieland wahrscheinlich beeinflußt werden könnte.

[1] J. WIDMARK, Über die Abnahme der Kurzsichtigkeit in den höheren Knabenschulen Schwedens. Mitt. a. d. Augenklinik d. Carol. Med.-Chir. Inst. zu Stockholm. X. Heft. 1909. S. 41.

Nach dem Gesagten ist es einleuchtend, daß die besonders unter unkorrigierten Myopen verbreitete Ansicht, die Myopie wäre eine Art Anpassung an die Bedürfnisse der Kultur, vollkommen falsch ist, indem eher, wenn man Kultur mit Nahearbeit identifizieren will, die Myopen diejenigen darstellen, welche die Kultur mit einer Invalidität bezahlen müssen.

Fälle von atypischer Myopie, welche in die Kategorie der Krümmungsametropie gehören, kommen bei abnormer Form der Hornhaut und der Linsenflächen vor. In dieselbe Kategorie, obwohl eigentlich eine „Indexmyopie" darstellend, gehört die im Zusammenhang mit den senilen Veränderungen der Linse im hohen Alter auftretende Myopie, sowie die zuerst von HIRSCHBERG[1] bei Diabetes, von MOAURO[2] bei Ikterus und von SCHIECK[3] bei einer Darmerkrankung gefundene temporäre Myopie, während die bei Iritis vorkommende temporäre Myopie, welche von SCHAPRINGER[4] als eine Indexmyopie aufgefaßt wurde, durch Entspannung der Zonulafasern bei der Schwellung des Ziliarkörpers erklärt wird. Die senile Myopie ist stets von einer charakteristischen Veränderung der Aberration begleitet und beruht auf einer Erhöhung des Totalindex der Linse. In dieser Richtung kann eine Erhöhung des Kernindex wirken, die Myopie kann aber auch ohne Veränderung desselben entstehen, indem bei der fortschreitenden Sklerose die Form der Isoindizialflächen geändert werden kann. Das Endstadium ist entweder die unter dem Namen des „falschen Lenticonus" gehende Lösung des durchsichtigen Kernes von der Kortikalsubstanz oder eine, gewöhnlich mit überwiegender Kernsklerose einhergehende, Starbildung. Die bei Diabetes vorhandene Disposition zur Starbildung macht es wahrscheinlich, daß die Fälle von bleibender Myopie bei älteren Diabetischen ähnlich sind. Die temporäre Myopie wurde von MOAURO und SCHAPRINGER auf eine Indexerhöhung des Kammerwassers bezogen, was aber, wie HESS[5] gezeigt hat, unmöglich ist. Dieselben dürften um so eher auf eine durch die veränderte Zusammensetzung der die Linse umgebenden Flüssigkeit bedingte Indexveränderung der Linsensubstanz zurückzuführen sein, als dadurch auch die bei Diabetes beobachtete temporäre Hypermetropie erklärt wird. Wenn nämlich die der Indexveränderung entsprechenden Niveauflächen nicht mit den Isoindizialflächen zusammenfallen, so wird die Anordnung derselben verändert, und kann der Totalindex bei der individuellen Verschiedenheit im Verlaufe der Isoindizialflächen dadurch sowohl erhöht wie herabgesetzt werden.

Zu den Ametropien im beschränkteren Sinne gehört der Astigmatismus nicht, da derselbe keinen eigentlichen Einstellungsfehler, sondern einen die exakte Einstellung vereitelnden Bildungsfehler ausmacht. Während bei den eigentlichen Ametropien von einer einzigen Abbildung in der Fovea centralis die Rede sein kann, ist dies beim Astigmatismus nicht mehr zulässig, sondern es müssen beide Abbildungen auseinander gehalten werden. Im ersteren Falle besteht eine punktförmige Korrespondenz von Objekt und Bild, im letzteren

---

[1] J. HIRSCHBERG, Diabetische Kurzsichtigkeit. Centralblatt f. prakt. Augenh. XIV. 1890. S. 7.

[2] G. MOAURO, *Di alcune alterazioni oculari in malattie epatiche. Lavori della clin. oculist. di Napoli.* III. 1893. S. 100.

[3] F. SCHIECK, Über temporäre Myopie. Klin. Monatsbl. f. Augenh. XLV. 1907. S. 40.

[4] A. SCHAPRINGER, *The proximate cause of the transient form of myopia associated with iritis. Amer. Journ. of ophth.* X. 1893. S. 399.

[5] a. a. O. S. 341.

nicht. Abgebildet werden nur Linien, welche zu den Hauptschnitten parallel sind, wenn diese Symmetrieebenen darstellen, sonst aber einen spitzen Winkel miteinander bilden können, während die Bildlinien auf der Netzhaut aufeinander senkrecht stehen. Bei hinreichend hohen Graden kann daher auch in den regelmäßigsten Fällen das Vorhandensein von Astigmatismus konstatiert und die Orientierung der Hauptschnitte ermittelt werden, indem der Kranke unter den auf einer Tafel gedruckten Meridianlinien eines Kreises die beiden bei verschiedener Einstellung scharf gesehenen Linien angibt, sei es, daß die Änderung der Einstellung durch die Akkommodation oder durch vorgehaltene Gläser bewirkt wird. Die Kürze der Brennstrecke in den gewöhnlichen Graden im Verhältnis zu der Größe der Aberration bewirkt aber, daß bei normaler Pupillengröße die Verhältnisse viel komplizierter sind, indem verschiedene Schnitte der kaustischen Fläche eine verschiedene Richtung der abbildbaren Linien bei verschiedener Einstellung bzw. eine doppelte Abbildung bedingen. Die Richtung der abbildbaren Linien, welche den Hauptschnitten entsprechen, kann dabei nur derart gefunden werden, daß die Brennstrecke in ihrer ganzen Ausdehnung vor die Netzhaut verlegt wird, indem dieselbe mit der Richtung der Kanten der kaustischen Fläche zusammenfällt, und nur die hintere Kante als alleinige Schnittlinie derselben mit der Netzhaut funktionieren kann, wie es aus der Fig. 121 S. 256 hervorgeht. Diese Form der kaustischen Fläche erläutert die Irrigkeit der sehr verbreiteten Ansicht, daß der Grad des Astigmatismus unter Anwendung der Meridianlinienfigur bestimmt werden könne. Dies kann nur unter Anwendung der Sehschärfe als Indikator geschehen, indem die maximale Sehschärfe des Auges — nicht etwa nur die „normale“ — der richtigen Korrektion des Astigmatismus entspricht. Die Häufigkeit des Astigmatismus und der Komplikation desselben mit abnormer Dezentration des Auges bewirkt, daß eine gewissenhafte Bestimmung der Refraktion und Sehschärfe größere Ansprüche an den Untersucher stellen kann als jede andere mir bekannte wissenschaftliche Untersuchung.

Die Grenze des normalen Astigmatismus des Auges dürfte bei dem Wert 0,5 D. gesetzt werden müssen, wobei im jugendlichen Alter die direkte, im höheren die inverse Form überwiegt. Es folgt hieraus, daß im jugendlichen Alter ein inverser Astigmatismus von 0,5 D. schon als pathologisch anzusehen ist. Die klinische Erfahrung lehrt auch, daß derselbe dem Kranken lästiger sein kann, als ein direkter Astigmatismus von 1 D. und mehr.

In den typischen Fällen von abnormem Astigmatismus ist der Fehler angeboren und offenbar durch statische Verhältnisse bei der Entwicklung und dem Wachstum des Auges bedingt. Erworbener Astigmatismus kommt, von dem normal im hohen Alter entstehenden und dem beim Glaukom durch die Druckerhöhung bedingten, inversen, abgesehen, hauptsächlich nach Erkrankungen und operativen Eingriffen an der Hornhaut vor.

IV. Der Mechanismus der Akkommodation.

Für die dioptrische Untersuchung der akkommodierenden Linse braucht man die Kenntnis der Formveränderung der Flächen und der Dickenzunahme, während die übrigen bei der Akkommodation wahrgenommenen Veränderungen weniger Bedeutung für die Dioptrik der akkommodierenden Linse als für den mechanischen Vorgang bei der Akkommodation haben.

Um nun das Problem des Mechanismus der Akkommodation zunächst vom optischen Standpunkte aus in Angriff zu nehmen, so ist es, um die Daten des dem oben angegebenen schematischen Auge entsprechenden schematischen akkommodierenden Auges ermitteln zu können, hinreichend, wenn die den genannten Veränderungen entsprechende Änderung der optischen Einstellung des Auges bekannt ist. Nun bedingen aber die Schwierigkeiten, welche durch die Dezentrationen der brechenden Flächen verursacht werden, und die unserer Kenntnisse von der Gestalt der peripheren Teile der Linsenflächen anhaftenden Mängel, daß die erforderlichen Daten vorläufig nicht hinreichend sicher bekannt sind. Es fehlt zwar nicht an Untersuchungen, aber die Ergebnisse können nur, was das Vorrücken des vorderen Linsenpoles und die Krümmungsveränderung der vorderen Linsenfläche betrifft, als einigermaßen zuverlässig angesehen werden. Auf Grund der älteren Beobachtungen[1] wählte HELMHOLTZ die schematischen Werte 0,4 bzw. 6 mm für die Ortsveränderung des vorderen Linsenpoles und den Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche im akkommodierenden Auge, während der Betrag der optischen Einstellungsänderung durch die Berechnung ermittelt wurde. Die Einstellungsänderung dürfte aber bei der Beobachtung größer sein, als es sich bei dieser Berechnung herausstellt, da bisher von keinem Beobachter eine Verkleinerung des Radius auf die Hälfte konstatiert worden ist, und das akkommodierende schematische Auge von HELMHOLTZ nur eine Einstellungsänderung von 6,5 Dioptrien repräsentiert. Auch die neuen Untersuchungen von TSCHERNING und BESIO[2] stimmen, wenn man sich an die relative Veränderung der Krümmung hält und die den Untersuchungsmethoden anhaftenden Fehlerquellen berücksichtigt, sehr gut zu diesen Werten. TSCHERNING fand zwar in dem von ihm untersuchten Falle kein Vorrücken der vorderen Linsenfläche, aber an deren Stelle ein Zurückweichen der hinteren, so daß eine Linsenverdickung von 0,3 mm resultierte, was er unter Betonung, daß die Ortsbestimmung der Linsenflächen nicht sehr genaue Werte gibt, auf individuelle Verschiedenheiten zurückführt. Hierzu ist nur zu bemerken, daß die Ortsbestimmung wesentlich sicherere Resultate ergibt, wenn die Vorsichtsmaßregel von HELMHOLTZ beobachtet wird, welche darin liegt, daß die Untersuchung nach gegenseitigem Wechsel in der Aufstellung des Fernrohres und der Lichtquelle erneuert wird, und wenn man die Hornhaut nicht als eine sphärische Fläche behandelt.

Zu ähnlichen Resultaten bin auch ich selbst gekommen. Ich hatte die Gelegenheit, während längerer Zeit einen intelligenten 19jährigen jungen Mann wiederholt zu untersuchen, welcher ein außerordentlich guter Schütze ist und

---

[1] S. die oben zitierten Arbeiten von KNAPP, ADAMÜK und WOINOW, MANDELSTAM und SCHÖLER, REICH sowie die Zusammenstellung in der 2 Aufl. dieses Handbuchs S. 147.

[2] a. a. O. Zusammengestellt bei TSCHERNING a. a. O. *Encycl. fr. d'ophth.* T. III. S. 266.

auch sehr gut fixiert. Die Ermittelung der Tiefe der vorderen Kammer geschah nach der Methode von Helmholtz, der Radius der Vorderfläche der Linse wurde mit seinem Ophthalmometer unter Anwendung der ophthalmometrischen Nernstlampen direkt gemessen, und die Berechnung wurde mit den exakten für die Abbildung bei schiefem Durchgang des Lichtes geltenden Formeln ausgeführt. Für die Verschiebung des Linsenpoles bei der Akkommodation auf eine in 10 cm Abstand von der Hornhaut befestigte Nadel erhielt ich Werte zwischen 0,3 und 0,4 mm. Für den Radius der vorderen Linsenfläche erhielt ich bei Akkommodationsruhe Werte zwischen 10,34 und 10,42 mm, bei Akkommodation auf 10 cm Werte zwischen 5,5 und 5,9 mm. Die bessere Übereinstimmung der Werte der vorderen Fläche der ruhenden als derjenigen der akkommodierenden Linse dürfte einesteils die Genauigkeit der Messungen, anderenteils aber auch die Schwierigkeit der genauen Akkommodation in der Nähe des Nahepunktes illustrieren, weshalb auch der kleinste Wert der richtige sein dürfte.

Von einer bei der Akkommodation eintretenden Ortsveränderung der hinteren Linsenfläche ist bisher nichts bekannt. Die Untersuchungen haben zwar manchmal eine geringe Verschiebung rückwärts oder nach vorn ergeben, aber die Methoden besitzen keine solche Genauigkeit, daß nicht diese Verschiebung auf die Fehlerquellen auch dann bezogen werden könnte, wenn die Linse wirklich homogen wäre. Die Eigenschaften des heterogenen Mediums bedingen aber noch andere Fehlerquellen, indem bei der Formveränderung der Linse der Verlaufstypus der Isoindizialflächen verändert wird, wie es sich unter anderem in einer Änderung des Totalindex kundgibt. Dies wäre nun von keiner so großen Bedeutung, wenn bei der Untersuchung der hinteren Linsenfläche der axiale Strahlengang benutzt werden könnte, weil dann eine Korrektion leichter einzuführen wäre. Da aber mit Notwendigkeit schief einfallendes Licht verwendet werden muß, so fehlen die zur Korrektion nötigen Mittel, solange nicht die genaue Form der vorderen Linsenfläche sowohl im ruhenden wie im akkommodierenden Auge bekannt ist. Hierzu kommt noch, daß wegen der bei der Akkommodation eintretenden Pupillenverengerung die in der hinteren Linsenfläche entstehenden Spiegelbilder oft nicht bei derselben Richtung der Augenachse untersucht werden können, wie die vorderen, wenn das Resultat nicht durch eine künstliche Pupillenerweiterung außerhalb der Grenzen des streng physiologischen Gebietes verlegt wird, und daß die Zentrierung des Auges durch die Akkommodation beeinflußt wird. Anbetrachts dieser Fehlerquellen ist es nicht auffallend, daß für die akkommodative Veränderung der Krümmung der hinteren Linsenfläche ziemlich abweichende Angaben gemacht werden. So fand unter den älteren Untersuchern Knapp Unterschiede von 0,5 bis 1,5 mm zwischen dem Radius der ruhenden und der akkommodierenden Linse. In dem von Tscherning gemessenen Falle ging der Radius der hinteren Linsenfläche bei der Akkommodation von 5,7 nur bis auf 5,3 mm herunter, während der Radius der vorderen Linsenfläche 9,7 bzw. 5,4 mm betrug, aber auf der anderen Seite bewegen sich die Zahlen von Besio um einen Unterschied von 1,0 mm.

Aus diesen Untersuchungen kann, wenn die obengenannten Fehlerquellen beachtet werden, kein anderer Schluß mit Sicherheit gezogen werden, als daß eine akkommodative Ortsveränderung der hinteren Linsenfläche bisher nicht bewiesen ist, und daß die Krümmung der hinteren Linsenfläche bei der Akkommodation, obwohl in geringem Grade, zunimmt.

Zu demselben Resultate ist neuerdings auch GERTZ[1] unter Anwendung einer eigenartigen Methode gekommen. Er untersuchte die Bedingungen, unter welchen der S. 192 erwähnte Lichtfleck als ein scharfes Bild, das sekundäre katadioptrische Bild, gesehen wird. Die wegen des unumgänglichen schiefen Lichteinfalls auftretenden Erscheinungen astigmatischer Strahlenbrechung deuten zwar Fehlerquellen an, welche die Methode, die sonst zur Kontrolle schematischer Augen geeignet wäre, dazu unbrauchbar machen. GERTZ hat auch keine diesbezüglichen Schlüsse gezogen, wohl aber gefunden, daß im untersuchten Falle der hintere Linsenpol bei der Akkommodation keine merkliche axiale Verschiebung erfuhr, und daß die Krümmung der hinteren Linsenfläche in dem gemeiniglich angenommenen Grad akkommodativ zunahm. Da es sich hierbei nur um den Vergleich der Ergebnisse verschiedener Untersuchungen eines und desselben Auges unter dem Einflusse ähnlicher Fehlerquellen handelt, so dürften sich die Fehler größtenteils gegenseitig aufheben und der Schluß berechtigt sein.

Um eine schematische akkommodierende Linse darzustellen, empfiehlt es sich, die Verhältnisse bei maximaler Akkommodation in jugendlichem Alter vor dem Auftreten der Diskontinuitätsfläche in der Linse zu repräsentieren. Ich habe deshalb die Einstellung auf annähernd 10 cm Abstand von der Hornhaut gewählt und im Anschluß an die oben erwähnten, von mir gefundenen Zahlen angenommen, daß sich der Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche bei der Akkommodation vom Werte 10 auf den Wert 5,33 mm verkleinere, während für die akkommodative Verschiebung des vorderen Linsenpoles der von HELMHOLTZ angenommene Wert 0,4 mm beibehalten ist. Bei dem geringen Werte, der den Bestimmungen der akkommodativen Formveränderung der hinteren Linsenfläche beigelegt werden kann, bleibt die Wahl der Krümmung der hinteren Linsenfläche im akkommodierenden Auge gewissermaßen der Willkür überlassen. Es scheint deshalb die Wahl der symmetrischen Form berechtigt, weil das schematische Auge die maximale Akkommodation darstellen soll und, soweit aus den Messungen geschlossen werden kann, die Linse sich bei der Akkommodation dieser Form möglichst nähert. Die hiermit angenommene akkommodative Krümmungsveränderung der hinteren Linsenfläche liegt einerseits zwischen dem von HELMHOLTZ und den von seinen Schülern gefundenen Werten, andererseits aber auch zwischen dem von TSCHERNING und den von seinem Schüler gefundenen, in beiden Fällen demjenigen des Lehrers näher. Von der Zuverlässigkeit dieses Wertes kann aber nur gesagt werden, daß unsere bisherigen Kenntnisse nicht ausreichen, um einen besseren anzugeben. Die Wahl des bestimmten Wertes 5,33 für die Krümmungsradien geschieht deshalb, weil dieser Wert den mit dem Gesetze von MATTHIESSEN übereinstimmenden Wert des Totalindex ergibt und dadurch die mathematische Prüfung dieses Gesetzes ermöglicht, ohne dabei von dem meiner Untersuchung entsprechenden Werte mehr abzuweichen, als durch die Fehlerquellen der Methoden erklärt werden kann. Da bei der Akkommodation die vordere Linsenfläche einer größeren Veränderung unterworfen ist als die hintere, so ist anzunehmen, daß bei der Verdickung der Linse der vor dem Punkte mit maximalem Index belegene Teil einer größeren Veränderung unterliegt, als der hintere, weshalb ein symmetrischer Bau der akkommodierenden Linse auch in dieser Hinsicht wahrscheinlich ist.

[1] H. GERTZ, Über das sekundäre katadioptrische Bild des Auges. Skand. Arch. f. Physiol. XXII. 1909. S. 299.

Die Brechkraft der Linse läßt sich aus der optischen Einstellung, den Daten des Hornhautsystems und der Länge des schematischen, nicht akkommodierenden Auges auf gewöhnliche Weise berechnen. Unter Anwendung eines optischen Zentrums der zu berechnenden Linse erhält man einen Approximativwert von rund 33 Dioptrien. Da jede Linsenfläche die Brechkraft von 9,375 D. hat, und da weiter die in die Rechnung einzuführende Brechkraft der Kernlinse etwas größer als der exakte Wert sein muß, die Brechkraftsumme der Einzelsysteme wiederum die Totalbrechkraft übersteigt, so ergibt sich der approximative Wert von 15 D. für die in die Berechnung einzuführende Brechkraft der Kernlinse. Die außer den so bestimmten Werten zur Ermittelung der Indizialgleichung der akkommodierenden Linse noch nötigen zwei Gleichungen ergeben sich aus den beiden Bedingungen, daß bei der Formveränderung keine Kompression im Linsenzentrum stattfinde, und daß das von der größten geschlossenen Isoindizialfläche begrenzte Volumen bei der Formveränderung unverändert bleibe, welche Bedingungen sich daraus ergeben, daß die bei der Akkommodation wirkenden Kräfte zu schwach sind um durch Kompression das Volumen und die physikalischen Brechungsindices der einzelnen Teilchen merkbar zu verändern.

Die in die Berechnung der akkommodierenden schematischen Linse eingeführten Werte sind somit:

$$-x_1 = x_2 = 2 \qquad \varrho_1 = -\varrho_2 = 5{,}333\ldots \qquad D = 0{,}015$$

und ergeben folgende Konstanten der Indizialgleichung

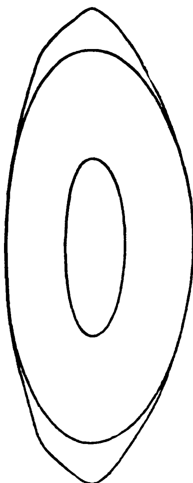
$$m = 0{,}0025031, \qquad n = 0{,}0023443,$$

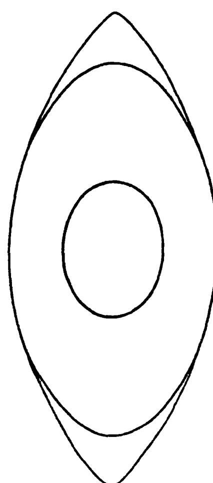
$$p_m = 0{,}0224907, \qquad p_o = 0{,}0021085, \qquad p_n = 0{,}0008399.$$

während wegen des symmetrischen Baues M und N gleich Null sind. Ich habe dieselben zunächst, wie bei der nicht akkommodierenden Linse, zur Berechnung einer Anzahl Koordinaten der Schnittpunkte der den Brechungsindizes 1,386 und 1,404 entsprechenden Isoindizialflächen mit einer Meridianebene benutzt und stelle diese Schnittlinien in der Fig. 134 den in der Fig. 133 reproduzierten der nicht akkommodierenden Linse angehörenden gegenüber. Die in diesen Figuren sichtbaren schematischen Schnittlinien der Linsenflächen habe ich dadurch konstruiert, daß dieselben so weit wie möglich gegen den Äquator hin als parabolisch behandelt wurden, während die Verbindungsstücke willkürlich gestaltet sind und schätzungsweise der Bedingung genügen, daß das zwischen den Linsenflächen und der größten geschlossenen Isoindizialfläche enthaltene Volumen bei der Formveränderung unverändert bleiben soll. Ich betone es ausdrücklich: diese Figuren sind nur betreffs der Isoindizialflächen und nur unter der Annahme des symmetrischen Baues der Kernlinse bei maximaler Akkommodation vollkommen exakt. Ihr Zweck ist, den optischen Mechanismus der Akkommodation, soweit es sich um die Abbildungsgesetze erster Ordnung auf der Achse handelt, objektiv darzulegen und den Zusammenhang dieses optischen Mechanismus mit der Dynamik der akkommodativen Veränderung der Linse schematisch zu illustrieren. Betreffs ersterer Frage ist zu bemerken, daß ein geringer Krümmungsunterschied, wie er, wenn man den ophthalmometrischen Messungen hinreichende Beweiskraft zuerteilen wollte, wohl in manchem Auge vorhanden sein könnte, nur einen sehr kleinen Wert von N bewirken würde, dessen Einfluß auf den Verlauf der Isoindizialflächen kaum merkbar

wäre, wovon man sich übrigens auch ohne Rechnung leicht überzeugen kann, wenn man bedenkt, daß die relativ starke Durchbiegung der akkommodationslosen Linse nur den durch die Fig. 133 repräsentierten asymmetrischen Verlauf der Isoindizialflächen bewirkt. Was wiederum den Zusammenhang des optischen Mechanismus mit der Dynamik der Akkommodation betrifft, so wird weiter unten darauf zurückzukommen sein und es soll hier nur gleich darauf aufmerksam gemacht werden, daß, wenn die vordere Linsenfläche in Übereinstimmnng mit den Untersuchungen von Besio eine stärkere periphere Abflachung hat als die hintere, dadurch eine Asymmetrie der äußeren Linsenform ohne Asymmetrie der Kernlinse bedingt werden könnte.

Ein Vergleich des Verlaufs der Isoindizialflächen in der ruhenden und akkommodierenden Linse lehrt unmittelbar, daß die bei der Dickenzunahme der Linse stattfindende Verschiebung einzelner Teilchen in der Richtung nach der Achse zu den größten Betrag in der Äquatorealebene erreicht, und daß hier die der Linsenachse näher liegenden Teilchen sich mehr verschieben als die näher dem Äquator belegenen. Wie aus der mathematischen Untersuchung hervorgeht, ist letzteres Verhalten ein Ausdruck für die Veränderung des Totalindex bei der Formveränderung der Linse. Da dasselbe nun aus dem anatomischen Baue der Linse a priori hätte postuliert werden können, so folgt hieraus, daß die bei der Akkommodation eintretende Veränderung des Totalindex mit Notwendigkeit durch die anatomische Struktur der Linse bedingt wird.


Fig. 133.


Fig. 134.

Um diesen Zusammenhang zu verstehen, braucht man sich nur daran zu erinnern, daß die Linsenfasern vorn und hinten befestigt sind und im Verlaufe Bögen beschreiben, welche nach dem Äquator zu konvex sind. Wenn sich bei der Dickenzunahme der Linse die Befestigungspunkte der Fasern voneinander entfernen, muß der Bogen gestreckt werden, wobei die ausgiebigste Dislokation der Teilchen in den von den Befestigungsstellen am weitesten entfernten Partien der Fasern stattfinden muß. Wenn die Linse stets symmetrisch wäre, müßte somit eine zentripetale Verschiebung am Äquator stattfinden. Bestimmt man an jeder Linsenfaser den Punkt, wo die zentripetale Verschiebung den Maximalwert hat, und legt man durch diese sämtlichen Punkte eine Fläche, die Fläche maximaler akkommodativer Verschiebung, so würde diese Fläche mit der Äquatorealebene zusammenfallen. Da nun aber die ruhende Linse asymmetrisch ist, und die Formveränderung sich wesentlich an der vorderen Fläche abspielt, so muß die Fläche maximaler akkommodativer Verschiebung nach vorn konkav sein. Dieser ausschließlich aus dem anatomischen Baue der Linse unter Berücksichtigung der asymmetrischen akkommodativen Formveränderung gezogene Schluß ergibt sich auch direkt aus den obenstehenden Figuren als Resultat der mathematischen Analyse. Die geringe Formveränderung der hinteren Linsen-

fläche beweist, daß die Befestigungspunkte der dieser Fläche anliegenden Linsenfasern sich bei der Akkommodation durchschnittlich weniger voneinander entfernen müssen als diejenigen der der vorderen Linsenfläche anliegenden Fasern. Da nun erstere Fasern durchschnittlich mehr peripheriewärts an der vorderen, mehr zentralwärts an der hinteren Fläche befestigt sind, während letztere Fasern sich umgekehrt verhalten, so muß während der Akkommodation der Abstand des hinteren Linsenpoles von der vorderen Anheftungszone der Zonula relativ weniger verändert werden als der Abstand des vorderen Linsenpoles von der hinteren Anheftungszone, und muß die Verschiebung an der vorderen Anheftungsstelle in einer mit der Tangente der Fläche annähernd zusammenfallenden Richtung stattfinden. Es geht somit aus dem anatomischen Baue der Linse hervor, daß bei der akkommodativen Formveränderung die Krümmungszunahme der vorderen Linsenfläche von einer axipetalen Verschiebung der vorderen Anheftungsstelle der Zonulafasern begleitet ist. Wie aus den obenstehenden Figuren hervorgeht, beweist die mathematische Untersuchung das Vorhandensein einer entsprechenden Verschiebung an den dieser Anheftungsstelle am nächsten liegenden Teilen der größten geschlossenen Isoindizialfläche.

Da die Fläche maximaler akkommodativer Verschiebung Querschnitte oder wenig schräge Schnitte der Linsenfasern enthält, so muß die Geschwindigkeit der akkommodativen zentripetalen Bewegung dieser Schnitte in einem der Achse näher liegendem Punkte größer sein als in der Nähe des Äquators. Wenn z. B. in 4 mm Abstand von der Achse eine zentripetale Bewegung von 0,1 mm stattfindet, so ist der Flächeninhalt der durch den Kreis mit dem Radius 4 mm hindurchgehenden Fasernquerschnitte gleich 0.8 π qmm, und muß derselbe Flächeninhalt durch den Kreis mit dem Radius 2 mm hindurchgehen, was hier einer zentripetalen Bewegung von 0,2 mm entspricht. Dieser Mechanismus könnte zwar dadurch verhindert werden, daß die näher der Achse belegenen Fasern bei der Akkommodationsruhe schief, in der akkommodierenden Linse aber senkrecht von der Fläche maximaler Verschiebung geschnitten würden, wenn ein solcher Vorgang in dem dazu erforderlichen Grade möglich wäre. Um den skizzierten Unterschied der zentripetalen Verschiebung auszugleichen, müßte aber der schiefe Schnitt einen Winkel von 60° mit dem senkrechten bilden, was offenbar undenkbar ist. Es geht somit aus dem anatomischen Baue der Linse auch noch hervor, daß die äquatorealen Durchmesser der kleineren Isoindizialflächen bei der Akkommodation relativ mehr verkürzt werden als die der größeren. Da die mathematische Untersuchung bewiesen hat, daß dies ein Ausdruck für die Zunahme des Totalindex ist, so folgt hieraus, daß die durch die physiologisch-optischen Untersuchungen bewiesene Zunahme des Totalindex der Akkommodation direkt aus dem anatomischen Baue der Linse deduziert werden kann. Daß bei dieser Verwertung des anatomischen Baues der Linse von der Möglichkeit einer Veränderung der sogenannten S-förmigen Krümmung der Linsenfasern abgesehen worden ist, beruht darauf, daß diese Krümmung, welche darin ihren Ausdruck findet, daß die Projektion einer Linsenfaser auf die Äquatorealebene nicht geradlinig ist, nur durch radial gerichtete Vertiefungen und Erhebungen beeinflußt werden kann, indem dieselbe durch die reihenförmige Anordnung der Befestigungspunkte der Linsenfasern bedingt wird, und eine Verschiebung der einzelnen Fasern zueinander an diesen Punkten ausgeschlossen ist. Dagegen folgt es wiederum aus der anatomischen

Anordnung der Linsenfasern, daß bei der akkommodativen Formveränderung solche Vertiefungen und Erhebungen an den Isoindizialflächen entweder entstehen oder, wenn schon vorhanden, verändert werden müssen. Denn sonst würden dieselben bei der Akkommodation eine Verminderung des Flächeninhaltes erleiden, was wohl möglich wäre, wenn die Linse aus frei beweglichen Teilchen zusammengesetzt wäre, bei der tatsächlich durch die Anordnung der Fasern beschränkten Verschieblichkeit aber unmöglich ist. Die mathematisch notwendige Folge dieser akkommodativen Veränderung der Isoindizialflächen ist aber die Veränderung der um einen leuchtenden Punkt sichtbaren Strahlen.

Durch das Hineindrängen einzelner Fasern zwischen andere kann eine geringe Indexerhöhung an einem bestimmten Punkte entstehen, obwohl die physikalischen Indices der einzelnen Fasern nicht verändert werden. Auf diese Weise wird es erklärlich, daß die in den Figuren repräsentierte kleinere Isoindizialfläche bei der Akkommodation scheinbar dem vorderen Linsenpol etwas näher kommt, indem der beim Vorrücken größer gewordene Flächeninhalt des der Achse nächstliegenden Teiles derselben ein Hineindringen von Fasern aus der zentralen Partie bedingen muß.

Es hat somit die dioptrische Untersuchung der akkommodierenden Linse zur Kenntnis des in der Linsensubstanz vorsichgehenden akkommodativen Veränderungen geführt, und es hat sich dabei herausgestellt, daß diese Veränderungen, welche zweckmäßig unter dem Namen des intrakapsulären Akkommodationsmechanismus zusammengefaßt werden können, nicht nur im vollsten Einklange mit dem anatomischen Baue der Linse stehen, sondern auch den ursächlichen Zusammenhang dieses Baues mit der durch die Refraktionsänderung bei der Entfernung der Linse und bei der Akkommodation bewiesenen akkommodativen Veränderung des Totalindex der Linse beweisen und erklären.

Die zur Berechnung der schematischen akkommodierenden Linse nötigen Daten, Brechkraft der Kernlinse und Örter der Hauptpunkte derselben sind mit dem Millimeter als Einheit

$$D_k = 0{,}01496\,, \qquad -H = H' = 0{,}012566\,,$$

wo die Abstände, wie bei der akkommodationslosen Linse, vom Linsenzentrum gerechnet werden. Bei der Ermittelung der äquivalenten Kernlinse zeigt es sich, daß eine mathematisch exakte Äquivalenz unmöglich ist, weil die Hauptpunkte der reellen Kernlinse zu weit auseinander liegen. Die Werte

$$r_1 = -r_2 = d = 2{,}6551\,,$$

welche dem bei der äquivalenten Kernlinse erreichbaren maximalen Hauptpunktabstand entsprechen, sind aber für die schematische Linse hinreichend genau, da der Unterschied des Hauptpunktinterstitiums der reellen und der äquivalenten Kernlinse nicht den Wert von 0,007 mm erreicht. Die Zusammensetzung der drei Einzelsysteme der Linse ergibt für das Vollsystem derselben mit dem Meter als Einheit:

$$D_l = 33{,}055\,, \qquad 1000\, n_2\, H_l = -1000\, n_2\, H_l' = 1{,}9419\,,$$

welche Werte für die reelle Kernlinse gelten. Für die äquivalente ergibt sich 33,056 bzw. 1,9449.

Der Totalindex ist in dem exakten schematischen Auge 1,426 und erhält im System des vereinfachten schematischen Auges unter Vernachlässigung der Hauptpunktdistanz den Wert 1,424.

Ich stelle in folgender Tabelle unter Zugrundelegung der äquivalenten Kernlinsen die Werte des exakten und des vereinfachten schematischen Auges in Akkommodationsruhe und in maximaler Akkommodation nebeneinander. Die Brechkräfte sind in Dioptrien, die Längenmaße in Millimetern angegeben.

Während das exakte schematische Auge in Akkommodationsruhe eine Hypermetropie von 1 D. auf der Achse hat, um tatsächlich das emmetropische Auge zu repräsentieren, kann dieser Einfluß der Aberration nicht betreffs des akkommodierenden Auges in Rechnung gezogen werden, da der Betrag der Aberration desselben bisher unbekannt ist. Wegen der bei der Akkommodation eintretenden Pupillenverengerung wird aber jedenfalls die Einwirkung einer eventuell vorhandenen Aberration wesentlich vermindert. Dieselbe Pupillenverengerung bewirkt aber auf der anderen Seite, daß der praktische Nahepunkt des schematischen Auges dem Auge etwas näher liegen muß als der exakte Nahepunkt, indem die Tiefe der Abbildung hinzugezählt werden muß.

Zu dem vereinfachten schematischen Auge ist zu bemerken, daß der Unterschied des Totalindex der Linse von den oben angegebenen, der Linse des exakten schematischen Auges entsprechenden Werten darauf beruht, daß anstatt der Hauptpunkte der Linse ein optisches Zentrum angenommen ist, und daß bei Akkommodationsruhe von der Einwirkung der Aberration abgesehen wird.

Auf einen Vergleich mit den bisher vorgeschlagenen schematischen Augen hier einzugehen, dürfte um so eher überflüssig sein, als dieselben wohl manchmal die durch die Refraktionsänderung bei der Linsenextraktion sich ergebende Brechkraft der Linse berücksichtigen, dabei aber den Zusammenhang der Formveränderung der Linse mit dem Betrage der Akkommodation in der Regel vollkommen unberücksichtigt lassen, was seinen Grund offenbar darin hat, daß ein den Tatsachen entsprechendes schematisches Auge erst durch die Kenntnis der Dioptrik der heterogenen Medien ermöglicht worden ist. Nur soll betreffs der Brechkraftwerte darauf aufmerksam gemacht werden, daß dieselben nicht mit den Angaben von Tscherning und seinen Schülern direkt vergleichbar sind, weil bei ihnen der wissenschaftliche Begriff der Brechkraft nicht überall angewendet wird, und die Dioptrie keine Maßeinheit kommensurabler Größen darstellt.

Ein Vergleich des Linsensystems des exakten schematischen Auges in Akkommodationsruhe und in maximaler Akkommodation, wie in der Fig. 135, deutet, obwohl nur schematisch, den oben bewiesenen intrakapsulären Mechanismus der Akkommodation an.

Während somit dieser Mechanismus für die ganz jugendliche Linse bekannt ist, kann man sich betreffs der Linse des mittleren und höheren Lebensalters nur auf dem Wege der Vorstellung dem Problem nähern, weil die Gestalt der Diskontinuitätsflächen in der Linse unbekannt ist. Solange die Linse einen kleinen axialen Spalt aufweist, wie es in Kinderaugen der Fall ist (s. die schematische Zeichnung von Babuchin Fig. 136), wird der intrakapsuläre Mechanismus wahrscheinlich unverändert bleiben, indem dieser Spalt bei der Spannung der Zonula verkürzt werden und der meridionale Durchschnitt desselben entweder die Gestalt eines kleinen Kreuzes oder eines radiären Spaltes annehmen muß. Wenn mit zunehmendem Alter die zentralen Partien homogener werden,

Schematisches Auge.

	Exakt		Vereinfacht	
	Akkommodationsruhe	Max. Akkommodation	Akkommodationsruhe	Max. Akkommodation
Brechungindex.				
Hornhaut	1,376	1,376		
Kammerwasser und Glaskörper .	1,336	1,336	1,336	1,336
Linse	1,386	1,386	1,413	1,424
Äquivalente Kernlinse	1,406	1,406		
Ort.				
Vordere Hornhautfläche . . .	0	0	0	0
Hintere Hornhautfläche . . .	0,5	0,5		
Vordere Linsenfläche	3,6	3,2		
Vordere Fläche d. äquiv. Kernlinse	4,146	3,8725		
Hintere Fläche d. äquiv. Kernlinse	6,565	6,5275		
Hintere Linsenfläche	7,2	7,2		
Optisches Zentrum der Linse . .			5,85	5,2
Krümmungsradius.				
Vordere Hornhautfläche	7,7	7,7		
Hintere Hornhautfläche	6,8	6,8		
Äquivalente Hornhautfläche . .			7,8	7,8
Vordere Linsenfläche	10	5,33 ..	10	5,33 ..
Vordere Fläche d. äquiv. Kernlinse	7,911	2,655		
Hintere Fläche d. äquiv. Kernlinse	– 5,76	– 2,655		
Hintere Linsenfläche	– 6	– 5,33 ..	– 6	– 5,33 ..
Brechkraft.				
Vordere Hornhautfläche	48,83	48,83		
Hintere Hornhautfläche	– 5,88	– 5,88		
Äquivalente Hornhautfläche .			43,08	43,08
Vordere Linsenfläche . . .	5	9,375	7,7	16,5
Kernlinse	5,985	14,96		
Hintere Linsenfläche	8,33 ..	9,375	12,833 ...	16,5
Hornhautsystem.				
Brechkraft	43,05	43,05	43,08	43,08
Ort des ersten Hauptpunktes . .	– 0,0496	– 0,0496	0	0
Ort des zweiten Hauptpunktes . .	– 0,0506	– 0,0506	0	0
Vordere Brennweite	– 23,227	– 23,227	– 23,214	– 23,214
Hintere Brennweite	31,031	31,031	31,014	31,014
Linsensystem.				
Brechkraft	19,11	33,06	20,53	33
Ort des ersten Hauptpunktes . .	5,678	5,145	5,85	5,2
Ort des zweiten Hauptpunktes .	5,808	5,255	5,85	5,2
Brennweite	69,908	40,416	65,065	40,485
Vollsystem.				
Brechkraft	58,64	70,57	59,74	70,54
Ort des ersten Hauptpunktes .	1,348	1,772	1,505	1,821
Ort des zweiten Hauptpunktes .	1,602	2,086	1,631	2,025
Ort des ersten Brennpunktes . .	– 15,707	– 12,397	– 15,235	– 12,355
Ort des zweiten Brennpunktes .	24,387	21,016	23,996	20,963
Vordere Brennweite	– 17,055	– 14,169	– 16,740	– 14,176
Hintere Brennweite	22,785	18,930	22,365	18,938
Ort der Netzhautfovea . . .	24	24	24	24
Axiale Refraktion	+ 1,0	– 9,6	0	– 9,7
Ort des Nahepunktes		– 102,3		– 100,8

beginnt die Formveränderlichkeit im Linsenzentrum abzunehmen, wobei die maximale Krümmungsveränderung der Linsenflächen nicht dieselbe Erhöhung des Totalindex der Linse bedingen kann. Es folgt hieraus, daß die Akkommodationsbreite schon abnimmt, bevor die Veränderungen im Kerne die Krümmungsveränderung der Linsenflächen beeinflußt. Bei der Formveränderung müssen, sobald die zentralen Teile weniger beweglich werden, Spannungen entstehen, welche zur Bildung der Diskontinuitätsfläche führen. Dies wird durch die neuerdings von ZEEMAN[1] beschriebene Verdoppelung des in der hinteren Linsenfläche entstehenden Spiegelbildes bewiesen, welche, wie oben bemerkt wurde, in mancher seniler Linse gesehen werden kann, wenn man in einer den Kernäquator streifenden Richtung untersucht, welche aber von ZEEMAN selbst

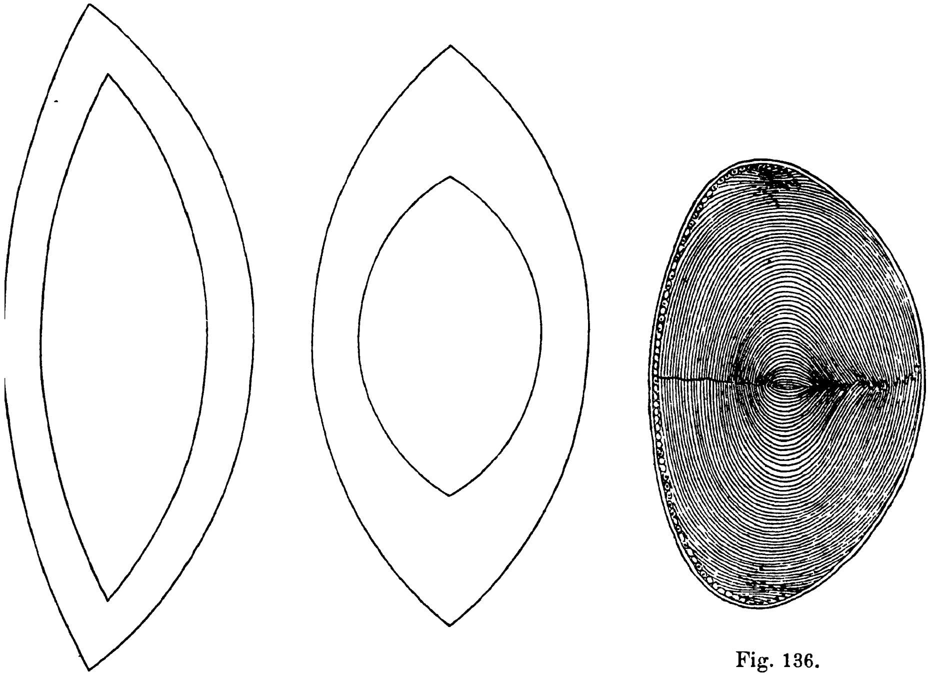


Fig. 135.

Fig. 136.

fälschlicherweise auf einen supponierten hinteren Lenticonus bezogen wurde. Daß endlich mit zunehmender Kernsklerose die Krümmungsänderung der Linsenflächen — wenigstens der vorderen — behindert wird, haben die Untersuchungen von ADAMÜK und WOINOW[2] bewiesen.

Bei der Untersuchung des extrakapsulären Akkommodationsmechanismus empfiehlt es sich zunächst die am menschlichen Auge beobachteten Tatsachen zusammenzustellen.

---

[1] W. P. C. ZEEMAN, Über die Form der hinteren Linsenfläche. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. XLVI. 1908. S. 83.

[2] a. a. O.

Außer der schon gewürdigten Krümmungsänderung der Linsenflächen und der Dickenzunahme der Linse machte HELMHOLTZ in erster Linie auf die die Akkommodation begleitende Pupillenverengerung aufmerksam. Es ist gestritten worden, ob dieselbe mit der Akkommodation oder mit der Konvergenz der Gesichtslinien assoziiert sei. Hierüber haben klinische Beobachtungen gelehrt, daß bei vollständiger diphtherischer Lähmung der Akkommodation die Pupillenverengerung mit der Konvergenz erfolgt, und daß bei Abwesenheit der Konvergenz die akkommodative Pupillenverengerung unbehindert sein kann. Das wahrscheinlichste dürfte sein, daß alle drei Innervationen miteinander assoziiert sind und durch den Impuls zum scharfen Sehen in der Nähe ausgelöst werden. (Daraus, daß die Pupille durch mechanische Momente bei Entleerung der vorderen Kammer verengert wird, kann man nicht, wie TSCHERNING, den Schluß ziehen, daß die akkommodative Pupillenverengerung durch mechanische Momente bedingt werde.) Die Funktion der akkommodativen Pupillenverengerung ist in der Vergrößerung der Tiefe der Abbildung zu erblicken, indem die nötigen Akkommodationsvariationen beim Betrachten naher Gegenstände durch die vergrößerte Tiefe wesentlich vermindert werden. Mit der Aberration hat sie, wie weiter unten gezeigt werden soll, nichts zu tun. Welche Vorteile diese Pupillenverengerung bietet, dürfte man in der Zeit vor der Erfindung der Augengläser leichter verstanden haben als jetzt, weil sie damals das einzige Mittel gegen die normale Presbyopie darstellte.

Die bei der Akkommodation eintretende Veränderung der gestaltlichen Verhältnisse der vorderen Kammer wird seit der Erfindung der CZAPSKIschen binokulären Lupe am besten mit dieser beobachtet, da die von HELMHOLTZ angegebenen Versuche aus sogleich zu erörternden Gründen nicht immer positive Resultate ergeben. Man kann in dem mit diesem Instrumente erhaltenen stereoskopischen Bilde ohne Schwierigkeit nicht nur das Hervortreten der zentralen Partien, sondern auch — wenigstens bei ausgiebiger Akkommodation im jugendlichen Alter — das Zurückweichen in der Peripherie mit Sicherheit konstatieren. Letzteres Moment ist eine notwendige Folge des ersteren, da die in der vorderen Kammer enthaltene Flüssigkeitsmenge wegen der physiologischen Anklebung der Iris an der vorderen Linsenkapsel nicht durch Zurückströmen in die hintere Kammer verringert werden kann, erreicht aber nicht denselben Betrag, weil die aus den zentralen Teilen entwichene Flüssigkeitsmenge in der Peripherie einen Raum mit größerem Durchmesser und demnach geringerer Dicke einnimmt. Hieraus folgt offenbar nicht, daß der von HELMHOLTZ angenommene Mechanismus der peripheren Tiefenzunahme der vorderen Kammer nicht wirksam sei, sondern nur, daß derselbe für diesen Zweck überflüssig wäre. Daß er jedenfalls nicht ausreichend ist, beweist ein Fall von ULBRICH[1], wo in der Iris eine durch eine dünne Membran ausgekleidete Lücke vorhanden war, dadurch daß sich die Membran bei der Akkommodation einstülpte. Da die beim Vorrücken des zentralen Teiles der hinteren Wand der vorderen Kammer drohende Raumbeschränkung derselben durch ein Zurückweichen der peripheren Iristeile kompensiert wird, so müßte bei unverändertem Flächeninhalte der Iris eine Erweiterung der Pupille zustande kommen, oder, was damit gleichbedeutend ist, die mechanische Einwirkung der

[1] H. ULBRICH, Zur Lehre von der intraokulären Flüssigkeitsströmung. Ber. über die 34. Vers. d. Ophth. Ges. Heidelberg 1907. S. 105.

akkommodativen Formveränderung der Linse auf die Iris ist pupillenerweiternd. In Übereinstimmung hiermit entsteht bei plötzlicher traumatischer Raumbeschränkung in der vorderen Kammer entweder ein Losreißen der Iris von ihrer Anheftungsstelle oder, wenn sie genügend Zeit zum Entweichen hat, eine Umstülpung derselben.

Die akkommodative Verengerung der Eintrittspupille geschieht nicht konzentrisch. Dies wurde schon in der ersten Epoche der Ophthalmometrie bewiesen, indem sowohl KNAPP[1] wie ADAMÜK und WOINOW[2], deren Untersuchungen unter der Leitung von HELMHOLTZ ausgeführt wurden, konstant eine akkommodative Verschiebung des Pupillenzentrums in nasaler Richtung fanden. Da bei diesen Untersuchungen das Ophthalmometer in der Achse der Schmiegungsellipse aufgestellt war, und der Mittelpunkt der Eintrittspupille nasalwärts von dieser Achse lag, so dürfte diese exzentrische Verengerung der Eintrittspupille nicht durch die Asymmetrie der Hornhaut erklärt werden können, sondern es dürfte mit größter Wahrscheinlichkeit die anatomische Pupille dasselbe Verhalten zeigen. Daß, wenn dies nicht der Fall wäre, doch die Eintrittspupille eine Dezentration in bezug auf die Visierlinie zeigen muß, ist leicht einzusehen. Denn von zwei zur Visierlinie parallelen Strahlen, welche zum temporalen und nasalen Ende des horizontalen Durchmessers der Eintrittspupille gehen, hat ersterer einen größeren Inzidenzwinkel in der Hornhaut als letzterer. Mit der Größe des Einfallswinkels und mit dem Abstande des Inzidenzpunktes von der Pupillenebene wächst die Scheinverschiebung bei der Brechung. Wegen der schiefen Inzidenz der Visierlinie und wegen der Asymmetrie der Hornhaut variieren sowohl die Einfallswinkel wie die Abstände der Inzidenzpunkte von der Pupillenebene bei Änderung der Pupillengröße asymmetrisch, was damit gleichbedeutend ist, daß sich die Eintrittspupille nicht konzentrisch erweitern und verengern kann, wenn dies mit der anatomischen Pupille der Fall ist. In Übereinstimmung hiermit variiert auch, wie oben betont wurde, der Einfallswinkel der Visierlinie mit der Pupillengröße. Dasselbe Verhalten findet bei der akkommodativen Pupillenverengerung statt, wovon ich mich durch besondere Untersuchungen überzeugt habe.

Die Akkommodation ist oft bei unveränderter Visierlinie von einer Richtungsänderung der Augenachse begleitet. Wenn man unter Anwendung der ophthalmometrischen Nernstlampe mit vertikalem Spalte den von HELMHOLTZ in der Figur 59 S. 120 beschriebenen Versuch macht, dabei aber die Lampe so weit zurückschiebt, daß das Licht auf die Innenfläche der Sklera vor dem Irisansatze fällt, so sieht man bei der Akkommodation den kleinen Lichtfleck etwas mehr nach hinten liegen als in Akkommodationsruhe, wenn man das Auge über eine in 10 cm befestigte Nadelspitze gegen einen fernen Punkt blicken läßt, und der Untersuchte es versteht, einmal unter Fixieren des Punktes, einmal unter Fixieren der Nadelspitze scharf zu visieren. Die Bewegung zu verfolgen ist unmöglich, weil das Auge während der Einstellungsänderung Seitenbewegungen ausführt, aber der Unterschied in der Lage des hellen Fleckes läßt sich durch den veränderten Abstand desselben vom Hornhautlimbus beurteilen. Das Auge bewegt sich somit bei der Akkommodation temporalwärts, obwohl in geringem Gerade. Diese Bewegung dürfte, nebst der Pupillen-

---

[1] a. a. O.
[2] a. a. O.

verschiebung in nasaler Richtung, die Komplikation abgeben, durch welche die Eindeutigkeit der Ergebnisse der beiden Versuche von HELMHOLTZ über die akkommodative Gestaltveränderung der vorderen Kammer in vielen Fällen beeinträchtigt wird.

Die Erklärung derselben kann teilweise mit den Abbildungsgesetzen erster Ordnung gefunden werden. Wollte man nach der falschen Vorstellung von der Bedeutung der Knotenpunkte die Erscheinung beurteilen, so müßte eben das entgegengesetzte Verhalten stattfinden. Denn die Knotenpunkte rücken bei der Akkommodation nach vorn, die Gesichtslinie bildet deshalb im akkommodierenden Auge einen kleineren Winkel mit der Augenachse, und es müßte bei unveränderter Gesichtslinie das Auge nasalwärts bewegt werden. Die exakte Untersuchung des Verlaufs der Visierlinie lehrt aber, wie die Beobachtung, das Gegenteilige. Stellt n den Brechungsindex von Kammerwasser und Glaskörper, $d\, l$ den Ort der Pupille bzw. der Fovea dar, und sind $h_h\, h_h'\, h_t\, h_t'$ die Örter der Hauptpunkte des Hornhautsystems bzw. des Vollsystems sowie $D_h\, D_t$ die Brechkräfte, so erhält man aus den Formeln

$$\frac{n}{d - h_h'} = \frac{1}{p - h_h} + D_h \qquad \frac{n}{p' - h_t'} = \frac{1}{p - h_t} + D_t \qquad \varkappa = \frac{p' - h_t'}{n(p - h_t)}$$

die Örter $p\, p'$ der Ein- und Austrittspupille und den Vergrößerungskoeffizienten $\varkappa$ in denselben. Den Winkel der Visierlinie mit der Augenachse erhält man unter Anwendung des reduzierten angulären Projektionskoeffizienten, indem der Abstand der Fovea von der Achse projiziert wird. Da dieser gleich dem reziproken Werte des Vergrößerungskoeffizienten ist, so ist jener Winkel direkt proportional zum Werte $\frac{\varkappa}{l - p'}$, welcher im exakten schematischen Auge bei Akkomodationsruhe bzw. bei maximaler Akkommodation 44,67 bzw. 45,25, im vereinfachten schematischen Auge 44,7 bzw. 45,1 beträgt. Bei der Akkommodation entsteht somit eine Vergrößerung des zwischen der Visierlinie und der Augenachse eingeschlossenen Winkels, so daß bei unveränderter Visierlinie eine Augenbewegung nach außen bei der Akkommodation stattfinden muß. Die Größe dieser Bewegung dürfte aber nicht hinreichend sein, um auf die genannte Weise wahrgenommen werden zu können. Dagegen liegt in der akkommodativen Veränderung der Asymmetrienwerte längs der Visierlinie, worauf im betreffenden Kapitel zurückzukommen ist, die Ursache zu einer Bewegung des Auges, welche sich mit der eben untersuchten summieren kann.

Bei kräftiger Akkommodationsinnervation wird die Spannung der Zonula vermindert und erleidet die Linse eine Dezentration in der Richtung der Schwerkraft. COCCIUS[1] hatte Schwankungen des hinteren Linsenbildes und TSCHERNING[2] eine Dislokation desselben nach unten beschrieben. Keiner von beiden hatte aber das Wesen der Erscheinung verstanden, indem die Schwankungen auf Einwirkung des „M. tensor chorioideae" bezogen, die Abhängigkeit der Dislokation von der Schwerkraft nicht entdeckt wurde. Erst

[1] A. COCCIUS, Über die vollständige Wirkung des Tensor chorioideae. Ber. d. VII. intern. Ophth.-Kongr. Heidelberg 1888. S. 197.

[2] *Théorie des changements optiques de l'oeil pendant l'accommodation. Arch. de physiol.* VII, 1. 1895. S. 181.

durch die Arbeiten von HESS[1] hat diese Frage eine streng wissenschaftliche Beleuchtung und ihre definitive Lösung erhalten. Er konstatierte eine bei maximaler Akkommodationsanstrengung eintretende entoptische parallaktische Verschiebung einer kleinen in seiner Linse vorhandenen punktförmigen Trübung zur Pupille. Als Lichtquelle diente ein sehr kleines Loch, 12 mm vor dem Auge befestigt. Bei starker Akkommodationsanstrengung fand gegen Ende der entoptisch beobachteten Pupillenkontraktion eine Dislokation des entoptisch beobachteten Linsenpunktes nach oben im Zerstreuungskreise statt, und zwar erfolgte diese Verschiebung bei beliebiger Kopfhaltung und vertikaler Pupillenebene stets in der der Wirkung der Schwerkraft entgegengesetzten Richtung, während bei horizontaler Pupillenebene ohne Änderung der Fernpunktlage eine Zunahme der Akkommodationsbreite bei vornübergeneigtem, eine Abnahme bei hintenübergeneigtem Kopfe stattfand. Erstere Versuche beweisen, daß bei starker Akkommodation die Linsentrübung im Verhältnis zur Pupille eine Dislokation in der Richtung der Schwerkraft erleidet, letzterer, daß dasselbe mit der ganzen Linse der Fall ist. Daß im ersten Versuche auch die ganze Linse herabsinkt, wurde bei vorhandenen Trübungen der Linse objektiv gezeigt. Ferner konstatierte HESS, daß im Zustande kräftiger Akkommodationsinnervation die Linse bei Augenbewegungen schlottert — bei vielen Menschen kann man sogar die Iris am Schlottern teilnehmen sehen — und daß sowohl das Herabsinken der Linse in der Frontalebene und in sagittaler Richtung wie das Schlottern bei Eserinisierung zunimmt. Wird das Eserin erst nach Dilatation der Pupille durch Homatropin eingeträufelt, so kann der Akkommodationsvorgang im ersten Stadium der Eserinwirkung bei großer Pupille beobachtet werden. An den Spiegelbildern der Linse sieht man die Erscheinung auffallend verschieden, indem das Spiegelbild der hinteren Fläche allein zu schlottern scheint und entweder allein oder doch in höherem Grade als das der vorderen Linsenfläche herabsinkt. Wie HESS betont hat, kann ein Herabsinken der Linse stattfinden, ohne daß eine Dislokation des Spiegelbildes der vorderen Fläche vorhanden wäre, indem die scheinbare Lage des Krümmungsmittelpunktes durch die Bewegung relativ unbeeinflußt sein kann. Daß das Heruntersinken der Linse eben auf diese Weise stattfinden muß, geht, wie weiter unten auseinandergesetzt werden soll, aus dem anatomischen Baue der Zonula hervor. HESS[2] hat auch gezeigt, daß an der im Spiegelbilde der vorderen Linsenfläche mit der CZAPSKIschen Lupe sichtbaren, von dem Epithel herrührenden Zeichnung das Herabsinken der vorderen Linsenfläche beobachtet werden kann, sowie daß die vordere Linsenfläche in Fällen, wo an derselben isolierte Pünktchen gesehen werden können, das Schlottern mitmacht.

Die entoptische Messung des Herabsinkens der Linse ergab bei starker willkürlicher Akkommodation 0,3 bis 0,35 mm. Wurde der Kopf von der rechten auf die linke Schulter geneigt, so verschob sich die akkommodierende Linse um den doppelten Betrag, bei starker Eserinisierung aber um annähernd 1 mm. Beim Übergang von gehobener zu gesenkter Kopfhaltung verschob sich

---

[1] C. HESS, Über einige bisher nicht gekannte Ortsveränderungen der menschlichen Linse während der Akkommodation. Ber. über die XXV. Vers. d. Ophth. Ges. Heidelberg 1896. S. 41, sowie: Arbeiten aus dem Gebiete der Akkommodationslehre. Arch. f. Ophth. XLII, 1. S. 288 u. 2. S. 80. XLIII, 3. S. 477.

[2] Beobachtungen über den Akkommodationsvorgang. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. XLII. 1904. S. 1.

die Linse um 0,15 mm nach vorn. Erstere Messungen sind von Heine[1] durch Messung der bei der Dezentration eintretenden Scheinverschiebung gesehener Objekte und der Parallaxe der in der hinteren Linsenfläche und in der Hornhaut entstehenden Spiegelbilder bestätigt worden.

Die Beweglichkeit der Linse im Zustande starker Akkommodationsanstrengung beweist unwiderlegbar, daß kein Druckunterschied auf beiden Seiten derselben im akkommodierenden Auge besteht, während bei Akkommodationsruhe ein Druckunterschied in dem geringen, der Zonularspannung entsprechenden Betrage möglich ist. Eine durch die Akkommodation bewirkte Druckerhöhung im Glaskörper und in der vorderen Kammer ist von vornherein mit Hinsicht auf die Viskosität der Flüssigkeiten auszuschließen. Denn damit die Spannung der Chorioidea während des Akkommodationsaktes druckerhöhend wirken könne, müßte eine unbehinderte Nachfüllung des Suprachorioidealraumes stattfinden können. Die bezüglichen Untersuchungen von Hess und Heine[2] haben auch gelehrt, daß keine Druckerhöhung beobachtet werden kann. Letzterer[3] konnte, wie früher Beer, am überlebenden Kinderauge konstatieren, daß sich der Akkommodationsmechanismus bei fenestrierter Sklera unbehindert und ohne die geringste Bewegung des in der Skleralöffnung hervorquellenden Glaskörpertropfens vollzieht.

Direkte Beobachtungen über die Bewegung der Ciliarfortsätze bei der Akkommodation können ersichtlicherweise nicht am normalen unverletzten Auge gemacht werden, wohl aber in manchen Fällen nach einer Iridektomie und bei traumatischer oder kongenitaler Irideremie. An iridektomierten Augen hat Hess[4] ein Vorrücken derselben bei Eserinisierung konstatiert, wobei sie sich vor die Ebene des Linsenäquators schoben, während Grossmann[5] in einem Falle kongenitaler Irideremie die früher unsichtbaren Ciliarfortsätze durch Eserin sichtbar machen konnte, die Verschiebung aber als in der Richtung nach der Achse des Auges, nicht nach der Hornhaut zu stattfindend auffaßte. Der Unterschied ist nicht von prinzipieller Bedeutung für den Mechanismus der Akkommodation und dürfte vielleicht in einer anomalen Topographie des Ciliarmuskels im Grossmannschen Falle oder auch darin seine Erklärung finden, daß eine Iridektomie, welche hinreichend peripher ist, um die Ciliarfortsätze sichtbar zu machen, die Ursprungsstelle der Iris an dem Ciliarkörper interessieren muß, so daß die Mechanik der Bewegung der Ciliarfortsätze durch die Operation beeinflußt werden kann. (In Grossmanns Fall trat das Schlottern nach der Eserineinträufelung ein, und die akkommodative Formveränderung der Linse konnte konstatiert werden. Eine übermäßige Dickenzunahme und ausgiebige Verkleinerung des äquatorealen Durchmessers der Linse sowie eine Verschiebung derselben nach oben innen erweckt aber den Verdacht, daß Linse und Zonula nicht normal waren. Erstere zeigte punktförmige Trübungen im vorderen und hinteren Pol.)

Man hat den Linsenrand im iridektomierten Auge bei der Akkommodation

[1] L. Heine, Akkommodative Ortsveränderungen der Linse. Ber. über die XXVI. Vers. d. Ophth. Ges. Heidelberg 1897. S. 20.

[2] C. Hess und L. Heine, Arbeiten aus dem Gebiete der Akkommodationslehre. Arch. f. Ophth. XLVI, 2. S. 243.

[3] Ein Versuch über Akkommodation und intraokularen Druck am überlebenden Kinderauge. Arch. f. Ophth. LX, 3. 1905. S. 448.

[4] a. a. O. Die Refraktion und Akkommodation usw. S. 222.

[5] Karl Grossmann, *The mechanism of accommodation in man. Ophth. Review.* XXIII. 1904. S. 1.

und nach Einträufelung von Eserin breiter werden sehen, woraus aber keine Schlüsse gezogen werden können. Von einer akkommodativen Abnahme des äquatorealen Durchmessers der normalen Linse ist bisher nichts sicher bekannt. Nach HESS stellt sich der Linsenrand im atropinisierten Auge öfter als leicht wellenförmige, unregelmäßige Linie dar, während nach Eserineinträufelung eine regelmäßigere, mehr der Kreisform sich nähernde Linie gefunden wird. Seichte Hügel und zeltähnliche Erhebungen, welche am atropinisierten Auge in der Gegend der Anheftungsstelle der Zonulafasern an die Kapsel gesehen werden, können nach Eserineinträufelung verschwinden oder werden dabei flacher.

Vom Akkommodationsphosphen CZERMAKS abgesehen, sind hiermit die am lebenden Auge beobachteten Veränderungen bei der Akkommodation gewürdigt. Dasselbe dürfte eine mechanische Reizung der Netzhaut bei der plötzlichen Verminderung der Spannung der Chorioidea in seltenen, besonders disponierten Augen darstellen.

Die Dynamik der Ciliarmuskelkontraktion ist zum größten Teile schon durch die Untersuchungen von HENSEN und VÖLCKERS[1] aufgeklärt worden. Da die Hauptmasse der Muskelfasern — das meridionale Bündel — angenähert parallel zur Sclera verlaufen, so ist die wichtigste Frage die, ob bei der Kontraktion das hintere Ende nach vorn oder das vordere nach hinten gezogen wird. Es zeigte sich nun, daß, wenn am Äquator des Bulbus eine Nadel eingestochen wird, bei elektrischer Reizung des Ciliarmuskels an Hunden das äußere Ende der Nadel sich nach hinten bewegt, und daß kein Einstichpunkt gefunden werden kann, wo es sich nach vorn bewegt. Es folgt hieraus, daß die Kontraktion des Ciliarmuskels eine Bewegung der vorderen Teile der Chorioidea nach vorn verursacht, und daß kein Punkt desselben sich bei der Zusammenziehung nach hinten bewegt. Die Verschiebung der inneren Augenhäute nach vorn konnte auch durch ein Fenster der Sclera beobachtet werden. Wurde dagegen die Hornhaut bis auf einen peripheren 2 mm breiten Saum abgetragen, so wurde die elektrische Reizung des Ciliarmuskels von einem Zurückweichen dieses Saumes begleitet, wodurch bewiesen wird, daß die anatomisch bekannte vordere Ursprungsstelle des Muskels physiologisch als solche funktioniert. Außerdem wurde die Erschlaffung der Zonula bei der Ciliarmuskelkontraktion konstatiert. Da gewisse Abweichungen des Akkommodationsmechanismus beim Hunde von dem beim Menschen vorhanden sind, indem, wie HESS und HEINE[2] zeigten, durch die Ciliarmuskelkontraktion nur eine geringe Änderung der optischen Einstellung des Auges bewirkt wird, so stellt die mikroskopische Fixierung des Akkommodationsaktes durch HEINE[3] zuerst bei Tauben, dann bei Affen[4], eine wertvolle Vermehrung des Beweismateriales dar. Letztere Untersuchung illustriert daneben auf evidenteste Weise die Funktion der sich den streng meridionalen Bündeln anschließenden Bündel, welche in dem vorderen inneren Teil einen mehr radiären Verlauf haben. Ohne dieselben würde die bei der Kontraktion eintretende Dickenzunahme des

---

[1] V. HENSEN und C. VÖLCKERS, Experimentaluntersuchung über den Mechanismus der Akkommodation. Kiel 1868.

[2] a. a. O. Arch. f. Ophth. 1898.

[3] Mikroskopische Fixierung des Akkommodationsaktes. Ber. über du XXVI. Vers. d. Ophth. Ges. Heidelberg 1897. — Physiologisch-anatomische Untersuchungen über die Akkommodation des Vogelauges. Arch. f. Ophth. XLV, 3. 1898. S. 469.

[4] Die Anatomie des akkommodierten Auges. Ebenda. XLIX, 1. 1899. S. 1.

Muskels eine in der Richtung nach dem Zentrum des Bulbus wirkende Komponente zur Folge haben, während die Anlagerung derselben an der Innenfläche der meridionalen Faserbündel bewirkt, daß die durch Verkürzung und Dickenzunahme entstehende Resultante an der inneren Oberfläche des Ciliarkörpers in der Richtung der Tangente derselben wirkt. Im ersteren Falle hätte der Transversalschnitt des Muskels eine radiäre Richtung, bei der tatsächlichen anatomischen Anordnung der Muskelbündel stellt aber die Linie, welche die in einem Meridionalschnitte enthaltenen Fasern senkrecht schneidet, in erster Annäherung einen Kreis dar, dessen Mittelpunkt in der Nähe des Canalis Schlemmii liegt. Die der Dickenzunahme entsprechende Komponente fällt überall mit der Tangente dieses Kreises zusammen, welche wiederum, von den hintersten, dünnsten Teilen des Muskels abgesehen, überall einen spitzen Winkel mit der inneren Oberfläche des Ciliarkörpers bildet. Zu bemerken ist hierbei noch, daß die volle Dickenzunahme sich nach innen geltend macht, weil außen die Sclera anliegt, und daß ihr Effekt durch die konkave Form vergrößert wird. Stellt man sich nämlich einen ringförmigen Teil des Ciliarkörpers vor, so muß der Durchmesser dieses Ringes bei der Verschiebung nach vorn innen abnehmen, und muß der Ring in entsprechendem Maße dicker werden, auch wenn er keine sich verdickenden Muskelfasern enthält. Die Gesamtwirkung der meridionalen und radiären Fasern, welche übrigens zusammen ein einziges System bilden ist somit eine relativ *gleichmäßige Verschiebung der inneren Oberfläche des Ciliarkörpers in der Richtung ihrer Tangente*, während, wenn nur meridionale Faserbündel vorhanden wären, eine größere Verschiebung des hinteren Teiles als des vorderen stattfinden und der Effekt durch die Verdickung beeinträchtigt werden müßte. Bei diesem mit mathematischer Notwendigkeit aus dem anatomischen Baue des Ciliarmuskels resultierenden Sachverhalte, welcher durch die nach HEINE reproduzierten Figg. 137 und 138 illustriert wird, ist es nicht befremdend, daß die zirkulären Fasern, wenn überhaupt vorhanden, übereinstimmend mit den übrigen wirken. Da dieselben im inneren vorderen Winkel verlaufen, so kann ihre Kontraktion nur eine in diesem Punkte axialwärts wirkende Komponente bedingen, welche eine Drehung der Resultante in demselben Sinne bewirkt wie die Tangenten der Meridionalfasern gedreht werden müßten, um zur Tangente der inneren Oberfläche des Ziliarkörpers parallel zu werden. Ob dieser Muskel vorhanden ist oder nicht, ist somit von untergeordneter Bedeutung. Die Bündel des Hauptmuskels liegen nicht streng in den Meridianebenen, sondern bilden Flechtwerke und biegen sowohl am hinteren Ende in der Chorioidea wie am vorderen inneren Winkel um, wodurch der Eindruck eines zirkulären Muskels um so eher gewonnen werden kann, je weniger gestreckt die Fasern verlaufen. In Übereinstimmung hiermit sieht man an dem akkommodierenden Ciliarkörper viel mehr Schrägschnitte als an dem atropinisierten. Die Figuren illustrieren auch die Eröffnung des Canalis Schlemmii und des vorderen Kammerwinkels bei der Akkommodation. Da die vordersten radiären Fasern sich an der Innenseite des nämlichen Kanales inserieren, so ist diese Wirkung auf den SCHLEMMschen Kanal ebenso leicht verständlich wie das Zusammenarbeiten der zirkulären Fasern mit den radiären auch in dieser Beziehung. In welchem Grade die Eröffnung des Kammerwinkels durch die Ciliarmuskelkontraktion bewirkt wird, kann vorläufig nicht beurteilt werden, da die durch den ULBRICHschen Fall bewiesene Spannung der Iris während des Akkommodationsaktes in derselben Richtung wirken muß.

In der letzten Zeit hat HESS[1] neue Ergebnisse eingehender Untersuchungen über den Akkommodationsmechanismus publiziert. Diese haben zunächst gelehrt, daß bei Reptilien und Vögeln die Akkommodation in wesentlich verschiedener Weise vor sich geht, indem durch Druck der Binnenmuskulatur auf die vor dem Äquator gelegenen Teile der vorderen Linsenfläche die peripheren Teile derselben abgeplattet, die um den vorderen Pol gelegenen stärker gewölbt werden und dabei im enukleierten Auge eine akkommodative Druckerhöhung stattfindet. Die Verlagerung des vorderen Aderhautabschnittes nach vorn, welche am äquatoreal halbierten Bulbus einige Zeit nach der Enukleation bequem von hinten her beobachtet werden kann, erfolgt aber dabei in ähnlicher Weise wie bei Säugetieren.



Fig. 137.
Ciliarmuskel nicht kontrahiert.



Fig. 138.
Ciliarmuskel kontrahiert.

Endlich ist ihm auch die Fixierung des Akkommodationsaktes im menschlichen Auge gelungen, indem an zwei Kranken vor dem Tode das eine Auge stark eserinisiert, das andere atropinisiert wurde. Im einen Falle wurden die Augen $1^1/_2$ Stunden nach dem Tode enukleiert und 18 Stunden in Formol gehärtet, im anderen Falle 12 Stunden nach dem Tode enukleiert und direkt untersucht. Nach äquatorealer Halbierung zeigte sich bei Beobachtung und Messung von der Glaskörperseite her, daß im Eserinauge sowohl der Linsendurchmesser als der Durchmesser des von den Kuppen der Ciliarfortsätze

[1] C. HESS, Untersuchungen zur vergleichenden Physiologie und Morphologie des Akkommodationsvorganges. Arch. f. Augenheilk. LXII. 1909. S. 345. — Vergleichende

gebildeten Ringes kleiner, die Einkerbungen des Linsenrandes weniger ausgesprochen waren als im Atropinauge.

Die Linsenform wird vom Ciliarmuskel unter Vermittlung der Zonula beeinflußt. Die Fasern derselben entspringen an der Innenfläche des Ciliarkörpers in der ganzen Ausdehnung bis zur Ora serrata, wobei eine scheinbare Durchkreuzung dadurch entsteht, daß die zur vorderen und hinteren Linsenfläche gehenden Bündel alternieren, indem jene in der Regel mehr nach hinten und in den Tälern zwischen den Processus ciliares, diese und die zum Äquator gehenden mehr nach vorn und an den Kuppen der Fortsätze entspringen. Es folgt aus dieser Anordnung, daß die zur vorderen Fläche gehenden Zonulabündel bei der Kontraktion des Ciliarmuskels durchschnittlich größere Exkursionen in

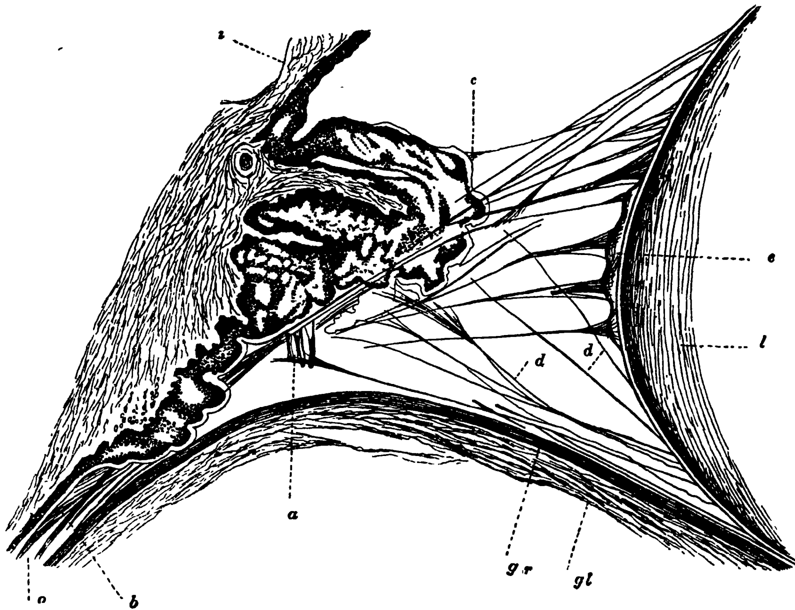


Fig. 139 nach Retzius.

l, Linse — *gl*, Glaskörper — *gr*, vordere Grenzschicht — *o*, Orbikularraum — *i*, Iriswurzel — *a*, kurze starke Anheftungsfasern der hinteren Zonulabalken — *b*, hinten aus der Glashaut entspringende Zonulafasern — *c*, vorn von dem Ciliarfortsatz entspringende Zonulafaser — *d*, von dem Ciliarfortsatz entspringende Zonulafasern, welche die Zonulabalken kreuzen und teilweise an ihnen haften — *e*, Räume zwischen der Linsenkapsel und der perikapsulären Membran.

ihrer Längsrichtung machen als die übrigen, indem jene in der Bewegungsrichtung liegen, diese einen Winkel mit derselben bilden. Die nach Retzius reproduzierte Fig. 139 illustriert auffallend deutlich dieses Verhalten. Nach derselben zu urteilen ist es sogar möglich, daß die am längsten vorn entspringenden zur hinteren Ansatzstelle an der Linse gehenden Bündel überhaupt bei der Kontraktion des Ciliarmuskels nicht merklich erschlaffen, sondern nur in veränderter Richtung wirken, während die zur vorderen Linsenfläche gehenden

Untersuchungen über den Einfluß der Akkommodation auf den Augendruck in der Wirbeltierreihe. Ebenda. LXIII. 1909. S. 88. — Briefliche Mitteilung einer voraussichtlich vor dem Erscheinen dieses Buches ebenda publizierten Untersuchung.

Bündel bei der Erschlaffung eine Bewegung der Ansatzstelle an der Linsenkapsel in der Richtung ihrer Tangente gestatten, welche angenähert dieselbe Größe haben muß wie die Bewegung des hinteren Teiles der inneren Oberfläche des Ciliarkörpers.

Welche Formveränderung die vordere Linsenfläche bei der Erschlaffung der vorderen Zonulafasern erfahren wird, läßt sich a priori nur insofern beurteilen, als mit Bestimmtheit vorausgesagt werden kann, daß die Krümmung der zentralen Partie zunehmen muß. Ob aber die Totalform sich dabei mehr einer sphärischen oder einer hyperbolischen nähert, entzieht sich vorläufig jeder Schätzung. Es ist zwar richtig, daß eine geschlossene elastische Membran, welche ein so großes Volumen einer inkompressiblen, frei beweglichen Materie einschließt, daß sie auch noch in der Gestalt des Kugels nicht schlaff wird, nach jeder Deformation die Kugelform anzustreben sucht. Solche Verhältnisse liegen aber bei der Linse gar nicht vor, wie die Form der von ihrer Umgebung losgelösten jugendlichen Linse zeigt. Bei diesem Sachverhalte ist die Form der vorderen Linsenfläche bei erschlafften vorderen Zonulafasern eine Funktion der Flächengröße und Elastizität der Linsenkapsel sowie der Verteilung der Spannung in derselben, welche sich weder berechnen noch abschätzen läßt. Es ist deshalb sehr wohl möglich, daß die peripheren Teile der vorderen Linsenfläche sich bei der Akkommodation abflachen, wie Besio[1] konstatiert zu haben glaubt, obwohl meiner Meinung nach dies nicht als bewiesen gelten kann, da die approximativen Berechnungsmethoden bedeutende Fehlerquellen bedingen können, und die Messungsmethoden überhaupt nicht sehr exakt sind. Übrigens scheinen seine Messungen unter Kokaindilatation ausgeführt worden zu sein, welche die Mechanik der Ciliarmuskelkontraktion auch dann beeinflussen kann, wenn die Akkommodationsbreite nicht abnimmt.

Da bei der Kontraktion des Ciliarmuskels die zur vorderen Kapselfläche gehenden Zonulafasern relativ mehr entspannt werden als die übrigen, so schrumpft die nützliche Anheftungsfläche sowohl an der Linse wie am Ciliarkörper immer mehr zusammen, indem sie sich an ersterer auf die äquatoreale und hintere Anheftungsstelle, am letzteren auf die vorderen Teile zusammenzieht. Dieser Mechanismus ist es eben, den ich an den Konturen der Linsenflächen in den Figg. 133 und 134 S. 331 in absichtlich übertriebener Weise schematisch habe darstellen wollen. Die skizzierte akkommodative Veränderung würde einer vollständigen Erschlaffung der zur vorderen Linsenfläche gehenden und einer Vorschiebung der ciliaren Anheftungsstellen der übrigen Zonulafasern entsprechen. Daß die Linse bei maximaler Akkommodation gerade diese Gestalt habe, ist gar nicht meine Ansicht, denn wenn die Erschlaffung jener Fasern nicht vollständig ist, kann der Mechanismus sehr wohl in einer etwas durchgebogenen Form resultieren, und wenn die zum Linsenäquator gehenden Fasern schon merkbar erschlafft sind, kann eine Verkleinerung des äquatorealen Durchmessers stattfinden. Auch dürften die äquatorealen Teile der Linse sowohl bei erschlaffter als bei gespannter Zonula mehr abgerundet sein als es die Figuren darstellen, weil die Zonulafasern an der Linse flächenartig inserieren. Daß aber die vom vorderen Teile des Ciliarkörpers zum Äquator und zur hinteren Kapselfläche gehenden Bündel am spätesten entspannt werden, geht aus der Art des Herabsinkens und des Schlotterns der Linse bei maximaler

[1] a. a. O.

Akkommodationsanstrengung hervor. Denn nur so kann es erklärt werden, daß bei diesen Bewegungen die Linse sich um eine annähernd durch den Krümmungsmittelpunkt der vorderen Fläche gehende Achse bewegt, so daß das in dieser Fläche entstehende Spiegelbild annähernd unbeweglich bleibt. Dies erfordert nämlich, daß derjenige Teil des Linsenrandes, welcher sich bei der Verschiebung der Linse der Augenachse nähert, durch einen exakt wirkenden Mechanismus nach vorn geneigt wird, und es gibt keinen anderen Mechanismus, welcher so wirken könnte als der Zug der genannten Fasern, woraus wiederum folgt, daß diese Fasern am wenigsten entspannt sind.

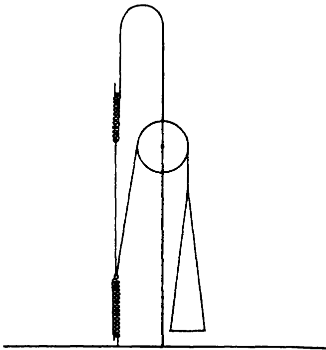
Anatomische und physiologische Untersuchungen haben somit unzweideutig gelehrt, daß bei der Kontraktion des Ciliarmuskels die ciliare Ursprungsstelle der Zonulabündel, vornehmlich der zur vorderen Linsenfläche gehenden, in der Verlaufsrichtung der Bündel nach der Linse zu verschoben wird, bis bei maximaler Kontraktion eine Erschlaffung derselben eintritt, und daß diese Kontraktion von einer Zunahme der Dicke der Linse und der Krümmung ihrer Flächen, besonders der vorderen, begleitet ist. Da die Erschlaffung der Zonula erst bei maximaler Kontraktion eintritt, so muß dieselbe bei normaler Kontraktion durch eine axipetale Bewegung der Ansatzstellen an der Linse, vornehmlich der vorderen, gespannt gehalten werden. Da nur eine Kraft vorhanden ist, welche diese Spannung unterhalten kann, nämlich die Elastizität der Linsenkapsel, so besteht der extrakapsuläre Teil des Akkommodationsmechanismus wesentlich in einer durch die Elastizität der Linsenkapsel bedingten axipetalen Bewegung der Ansatzstellen der Zonula an der Linse, vornehmlich der vorderen.

Die dioptrische Untersuchung des Akkommodationsvorganges hat einen intrakapsulären Akkommodationsmechanismus ergeben, welcher mit mathematischer Notwendigkeit aus der Formveränderung und der Brechkraftzunahme hervorgeht und in Übereinstimmung mit dem histologischen Baue der Linse eine axipetale Bewegung der den Ansatzstellen der Zonula, vornehmlich der vorderen, nächstliegenden, in der größten geschlossenen Isoindizialfläche enthaltenen Teilen der Linsensubstanz erfordert.

Wenn nun hierzu kommt, daß keine Tatsachen bekannt sind, welche diesem Mechanismus auf irgendwelche Weise widersprechen könnten — siehe hierüber unten bei der Besprechung der Hypothesen von Tscherning —, so dürfte es in den medizinischen Wissenschaften keine besser geschlossene Beweiskette geben, und haben die neueren Untersuchungen dargetan, daß der Akkommodationsmechanismus in allen wesentlichen Zügen unverändert dasteht, wie er nach der mit Rücksicht auf die damaligen Kenntnisse wirklich genialen Entdeckung von Helmholtz hervortrat.

In dem Lichte der neueren Lehre von der Antagonistenwirkung ist der doppelte Antagonismus von besonderem physiologischem Interesse. Die Gestalt der Linse wird durch zwei antagonistische elastische Kräfte bestimmt, während auf der anderen Seite die Muskelkraft und die stärkere der beiden elastischen Kräfte antagonistisch wirken. Es ist leicht einzusehen, daß diese Anordnung in vorzüglichstem Maße dazu geeignet ist, die Linse vor der Einwirkung zu starker äußerer Kräfte und vor plötzlichen Variationen dieser

Kräfte zu schützen. Die Kraft, welche die Formveränderung der Linse bei der Akkommodation bewirkt, ist die schwächste der drei im System vorhandenen und nimmt dazu noch, wie alle elastischen Kräfte, während der Entfaltung ihrer Wirkung konstant ab, so daß der Ruck am Ende der Formveränderung der kleinste mögliche wird, und die Energieentfaltung desselben einen gewissen, von der Elastizität der Zonula bedingten Maximalwert nicht überschreiten kann. Dieser Effekt wird noch dadurch vermehrt, daß bei zunehmender Kontraktion des Ciliarmuskels der elastische Widerstand der Chorioidea durch die Dehnung derselben zunimmt. Bei der Erschlaffung der Akkommodation ist wiederum das Maximum der formverändernden Kraft durch die Elastizität der Chorioidea bestimmt, und diese Kraft nimmt während der Bewegung stetig ab, während der Widerstand der Linsenkapsel gleichzeitig durch die Dehnung stetig zunimmt. Es ist sehr leicht, die Vorteile dieser Anordnung durch mechanische Modelle anschaulich zu machen. Ein solches ist in der Fig. 140 dargestellt. Von den beiden durch eine die Zonula vorstellende Schnur verbundenen Federn repräsentiert die obere die Linse, indem ihre Verkürzung der akkommodativen Formveränderung entspricht, ihre Kraft die Elastizität der Linsenkapsel darstellt. Die untere Feder veranschaulicht die Elastizität der Chorioidea und die Zugkraft der über die Rolle laufenden Schnur, welche durch Einlegen von Gewichten in die Schale geschaffen wird, entspricht der Kraft des sich kontrahierenden Ciliarmuskels. Die obere Feder muß schwächer als die untere sein und darf nicht stärker gespannt werden, als daß bei Heruntersinken der Schale auf die Tischfläche die die Federn verbindende Schnur schlaff wird. Es ist einleuchtend, daß das plötzliche Hineinwerfen der schwersten Gewichte in die Schale nicht die obere Feder beschädigen kann, und daß dieselbe ebensowenig durch plötzliche Wegnahme der Gewichte gefährdet wird, wenn man die Fallhöhe nicht zu groß, die untere Feder nicht zu stark gemacht hat. Wollte man hingegen einen fiktiven Akkommodationsmechanismus illustrieren, bei welchem die akkommodative Formveränderung durch Muskelwirkung, der Rückgang durch die Elastizität der Linsenkapsel bewirkt würde, so hätte man die Schale direkt am unteren Ende der oberen Feder aufzuhängen, wobei die Verlängerung der Feder der akkommodativen Formveränderung der Linse entsprechen würde. Dieselbe würde dann durch plötzliches Hineinlegen zu schwerer Gewichte beschädigt werden können. Solchem Übelstande könnte zwar durch passendes Abmessen der Fallhöhe entgangen werden, und auf dieselbe Weise wäre es möglich, daß bei diesem fiktiven Akkommodationsmechanismus die jugendliche Linse geschützt werden könnte. Bei der Abnahme der Formveränderlichkeit der Linse, welche Abnahme durch den Austausch der Feder gegen eine sprödere veranschaulicht werden kann, würde aber diese Schutzvorrichtung versagen: jeder kräftige Akkommodationsimpuls würde einen Ruck am Gefüge der Linse, eine plötzliche schwere Belastung der Schale das Zerspringen der Feder zur Folge haben. Wenn man weiß, daß Trübungen in vorher vollkommen durchsichtigen Linsen


Fig. 140.

älterer Leute durch die unbedeutende mechanische Gewalt entstehen können, welche in der schonenden Entleerung der Kammer bei einer Iridektomie liegt, so ist man geneigt, die Schutzvorrichtung nicht zu unterschätzen, welche in dem doppelten Antagonismus der bei der Akkommodation wirksamen Kräfte enthalten ist.

Da die Ciliarmuskelkontraktion nur so weit von einer Formveränderung der Linse begleitet wird, bis diese den maximalen, durch die Verschieblichkeit der Linsenteilchen bestimmten Grad erreicht hat, der Muskel aber, wie Pupillenverengerung und das schließlich auftretende Schlottern lehrt, in höherem Grade kontrahiert werden kann, so ist nur ein Teil der Ciliarmuskelkontraktion manifest, der übrige ist latent. Die Grenze wird von Hess beim Erreichen des wirklichen Nahepunktes gesetzt, während bei der latenten Ciliarmuskelkontraktion der Nahepunkt nur scheinbar etwas hineinrückt, was durch die dieselbe begleitende Pupillenverengerung bedingt wird. Es folgt hieraus, daß die Akkommodation von 2 D. in dem Alter, wo man nicht über größere Akkommodationsbreite verfügt, keine höheren Ansprüche an den Ciliarmuskel stellt, als dieselbe Akkommodation im jüngeren Alter gemacht hat, eine für die Symptomatologie der Presbyopie sehr wichtige Tatsache, bei deren Verwertung man sich jedoch daran zu erinnern hat, daß die durch die latente Ciliarmuskelkontraktion erzielbare Pupillenverengerung, besonders wenn die habituelle Pupillengröße nicht sehr klein ist, die unkorrigierten Presbyopen oft zu übermäßig starken Akkommodationsimpulsen verleitet. Eine andere wichtige Folge des Akkommodationsmechanismus, auf welche Hess aufmerksam gemacht hat, ist die, daß aus einer normalen Akkommodationsbreite nicht der Schluß auf einen normal funktionierenden Ciliarmuskel gezogen werden kann, indem eine Ciliarmuskelparese erst dann zutage tritt, wenn die Bewegungsbeschränkung sich bis ins Gebiet der manifesten Kontraktion erstreckt. Für die Methotik der physiologischen Optik hat dies insofern eine Bedeutung, als, wie oben bemerkt wurde, die Ansicht von Tscherning, daß das Kokain die Funktion des Ciliarmuskels nicht beeinträchtige, nicht an der Wirkung desselben auf die Akkommodationsbreite geprüft werden kann, mithin vorläufig unbegründet ist.

In der ophthalmologischen Literatur ist ziemlich viel von einer astigmatischen Akkommodation die Rede gewesen. Ohne hier näher auf den Gegenstand einzugehen, mag es nur erwähnt werden, daß keine bekannten Tatsachen die Möglichkeit einer willkürlichen Veränderung des Astigmatismus bei der Akkommodation bzw. der Einübung astigmatischer Akkommodation andeuten. Wohl aber ist es möglich, daß der normale inverse Linsenastigmatismus bzw. der Linsenastigmatismus, welcher in höheren Graden von Astigmatismus des Auges vorhanden ist, bei der akkommodativen Formveränderung der Linse in geringem Grade geändert werden kann. Daß es sich tatsächlich so verhalte, dafür liegen aber nicht hinreichende Beweise vor. Wegen des häufigen Vorkommens von vertikaler Asymmetrie des Auges, bei welcher der scheinbare Grad des Astigmatismus mit der Pupillengröße wechseln kann, dürfte auch die Beschaffung eines solchen Beweismaterials auf große Schwierigkeiten stoßen.

Nach dem Obenstehenden dürfte eine eingehende Kritik der Hypothesen, welche seit dem Entdecken des Mechanismus der Akkommodation durch Helmholtz aufgetreten sind, überflüssig sein, da dieselben sämtlich eine akkommodative Anspannung der Zonula annehmen, somit durch die Untersuchungen von

Hess tatsächlich widerlegt sind. Von diesen durch Mannhardt[1], Schön[2] und Tscherning vorgelegten Hypothesen hat aber die letztere so vielen Staub aufgewirbelt und in der Literatur so viele Beiträge zur Kenntnis der Psychologie der Wissenschaft (im weitesten Sinne des Wortes) niedergelegt, daß ein kurzes Eingehen auf dieselbe angezeigt erscheint. Da sie schon zwei, wesentlich verschiedene, Phasen durchgemacht hat und eben in die dritte einzutreten scheint, empfiehlt es sich zunächst die erste, wohl mehr bekannte, dieser Phasen zu erwähnen, wobei ich der Darstellung im oben zitierten Lehrbuch der physiologischen Optik folge. Die Hypothese besteht wesentlich aus drei Gliedern, nämlich der Annahme, daß die Akkommodation in einer vorübergehenden Bildung eines „Lenticonus anterior“ bestehe, der Annahme, daß die Spannung der Zonula die Bildung eines solchen zur Folge habe, und der Annahme, daß eine Spannung der vorderen Zonulafasern durch die Kontraktion des Ciliarmuskels bewirkt werden könne.

Als Grund für die erste Annahme wird angeführt, daß die Aberration des Auges während der Akkommodation sich in der Richtung verändere, daß die Brechkraft in der Mitte der Pupille mehr zunehme als in der Peripherie, und daß die Distorsion der in der vorderen Linsenfläche entstehenden Spiegelbilder sich bei der Akkommodation entsprechend ändere. Die Aberration wurde aber mit unzuverlässigen Methoden untersucht: das Aberroskop ergibt, wie ich bewiesen habe, nicht die Aberration, sondern einen Distorsionswert; bei dem Versuche mit dem leuchtenden Punkte ist die beschriebene Lichtverteilung im Zerstreuungskreise eine solche, daß sie bei der Beschaffenheit der kaustischen Fläche unmöglich durch die Aberration, wohl aber durch die oben beschriebene Interferenzerscheinung bedingt werden kann, und endlich ergeben die Versuche mit Youngs Optometer, wie die später hinzugezogenen skiaskopischen Phänomene[3], nur die periphere Totalaberration. Da die letzteren Versuche keine konstanten Resultate ergeben, indem die Änderung der skiaskopischen Aberrationsphänomene während der Akkommodation in vielen Fällen gar nicht gesehen werden kann, und die Untersuchung mit dem Optometer von Young z. B. bei Hess negatives Resultat ergeben hat, so kann hieraus nur geschlossen werden, daß die periphere Totalaberration des Auges in vielen Fällen während der Akkommodation abnimmt, und daß diese Erscheinung für den Akkommodationsmechanismus unwesentlich ist. (Siehe Näheres hierüber unten im betreffenden Kapitel.) Die Erscheinung der Distorsion der Spiegelbilder an der vorderen Linsenfläche kann, soweit meine Erfahrung reicht, nur bei kokainisierter Pupille mit hinreichender Sicherheit beobachtet werden, und ergibt somit erstens nichts über die normale Akkommodation. Zweitens ändert sich diese Distorsion ohne Veränderung der Abflachung der spiegelnden Fläche durch Änderung ihrer Krümmung und ihres Abstandes von der Hornhaut, so daß auch in dem Falle, daß die Einfallswinkel sehr klein wären, erst durch die entsprechende Rechnung sich ergeben würde, ob die Änderung der Distorsion einer Änderung des Abflachungswertes der Fläche entspräche. Drittens sind

[1] J. Mannhardt, Bemerkungen über den Akkommodationsmuskel und die Akkommodation. Arch. f. Ophth. IV, 1. 1858. S. 269.

[2] W. Schön, Zur Ätiologie des Glaukoms. Arch. f. Ophth. XXXI, 4. 1885. S. 1 und andere Schriften.

[3] *Le Mécanisme de l'accommodation. IX. Congr. internat. d'Utrecht. Compte rendu.* Amsterdam 1900. S. 244.

aber so große Einfallswinkel zur sicheren Konstatierung des Phänomens nötig, daß man nicht von der asymmetrischen Abflachung der Hornhaut abstrahieren darf, wodurch die Rechnung jedenfalls ziemlich kompliziert wird.

Die erste Annahme war somit völlig unbegründet, obwohl, wie hier nochmals betont werden soll, keine Beweise für die Unmöglichkeit derselben vorliegen. Sie wurde zu einem Fehlschluß benutzt. Unter der Rubrik „Akkommodationstheorie des Verfassers“ sagt Tscherning, daß die „Hypothese“ von Helmholtz nicht mehr aufrecht erhalten werden zu können scheint; wenigstens kann er selbst nicht verstehen, wie ein solcher Mechanismus eine Abflachung gewisser Partien der Linse und gleichzeitig eine Krümmungsvermehrung anderer verursachen könnte. Der einzige Schluß, welcher tatsächlich hieraus gezogen werden kann, ist, daß die Ursuche dieses mangelnden Verstehens entweder in der „Hypothese“ von Helmholtz oder bei Tscherning selbst gesucht werden muß. Helmholtz[1] sagt wörtlich: „Gespannte elastische Membranen, die ein unveränderliches Volumen einer inkompressiblen Flüssigkeit umschließen, und mit einem kreisförmigen Rande angeheftet sind, wie die Zonula an der Aderhaut, streben, je mehr ihre Spannung wächst, desto mehr sich der Form eines Kugelsegmentes zu nähern. Im ungespannten Zustande, beim Nahesehen, wölbt sich die vordere Linsenfläche vor der flachen Krümmung der vorderen Zonulafirsten hervor. Im gespannten Zustande, beim Fernsehen, viel weniger. Indessen ist der Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche von etwa 10 mm doch immer noch kleiner als der der Zonulawölbung, der etwa auf 14 mm zu schätzen ist.“ Er hat hiermit gesagt, daß das gesamte, aus Zonula und vorderer Linsenkapsel bestehende Gewölbe sich bei der Spannung der Zonula der sphärischen Form nähern muß. In dem fiktiven Endzustande, wo die sphärische Form erreicht wäre, würde somit die vordere Linsenfläche ein Kugelsegment mit etwa 14 mm Radius darstellen. Um hieraus den Schluß zu ziehen, daß die sich unter Abnahme der Spannung bei der Akkommodation hervorwölbende vordere Linsenfläche sich der Form einer Sphäre nähern müßte, oder daß die Vermehrung der Spannung eine Krümmungszunahme bewirken könne, dazu gehören Vorstellungen, welche mit den mathematischen Kenntnissen eines Helmholtz unvereinbar sind. Überhaupt kann ich bei ihm keine Andeutung über die wahrscheinliche Form der Linsenflächen im akkommodierten Zustande finden, was nicht wunder nehmen darf, da sich diese Form, wie oben betont wurde, weder berechnen noch schätzen läßt. Das einzige, das sich voraussagen läßt, ist eben die von Helmholtz betonte Zunahme der Flächenkrümmung und Linsendicke. Über die Verteilung der Krümmungszunahme auf die einzelnen Teile der Fläche oder darüber, ob bei derselben eine periphere Abflachung eintreten könne, ist nichts ausgesprochen worden und läßt sich auch nichts aus der Entspannung der Zonula deduzieren.

Die zweite Annahme Tschernings — daß die Spannung der Zonula die Bildung eines „Lenticonus anterior“ zur Folge habe — ist wiederum nur ein Fehlschluß, den er aus Experimenten gezogen hat, welche beweisen, daß an herausgenommenen Tierlinsen eine Traktion an der Zonula diesen Effekt haben kann. Experimenta crucis wurden von Einthoven[2], Hess[3] und Dalén[4] aus-

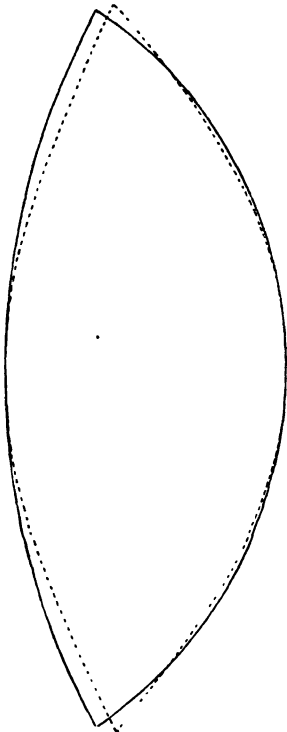
[1] Dieses Handbuch. 2. Aufl. S. 138.

[2] W. Einthoven, Die Akkommodation des menschlichen Auges. Ergebnisse der Physiologie. I, 2. 1902. S. 680.

[3] a. a. O. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 1904.

[4] a. a. O.

geführt. Ersterer konnte nach Freilegung der Linse und Zonula von vorne in einem Kalbsauge durch den Zug mit zwei Pinzetten an einander diametral gegenüberliegenden Punkten nach Belieben eine Vermehrung oder eine Verminderung der Krümmung der vorderen Linsenfläche erzielen, je nachdem der Zug mehr nach hinten oder nach vorn gerichtet wurde. HESS bewies, daß im frischen Affenauge nach Entfernung eines Teiles der Sclera ohne Verletzung der Uvea und nach Abtragung von Hornhaut und Iris ein Zug an der Zonula eine Krümmungsabnahme der vorderen Linsenfläche zur Folge hat, und DALÉN konstatierte ophthalmometrisch im menschlichen Leichenauge eine Krümmungszunahme der vorderen Linsenfläche nach Durchschneidung der Zonula, nachdem die Linse unter Beobachtung besonderer Kautelen durch Abtragen der Hornhaut und Iris bloßgelegt worden war.


Fig. 141.

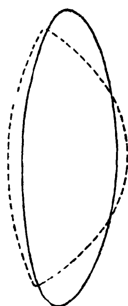
Die dritte Annahme — daß eine Spannung der vorderen Zonulafasern durch die Kontraktion des Ciliarmuskels bewirkt werden könne — basiert auf Vorstellungen über die Anatomie des Ciliarkörpers, welche nicht hinreichend klar ausgesprochen sind, aber darin zu gipfeln scheinen, daß es eine innerste Muskelschicht gäbe, durch deren Kontraktion das vordere innere Ende des Ciliarkörpers nach hinten gezogen würde, Vorstellungen, welche in keinem objektiv nachweisbaren Zusammenhange mit der bekannten Anatomie des Ciliarkörpers stehen. Der subjektive Zusammenhang knüpft an die an der Innenseite des SCHLEMMschen Kanales sich inserierenden Fasern an.

In der nach TSCHERNING reproduzierten Fig. 141 hat er die erste Phase seiner Vorstellung über den Mechanismus der Akkommodation veranschaulicht. Es ist nicht ohne Interesse, daß, wie ich bewiesen habe, ein solcher Akkommodationsmechanismus mathematisch unmöglich ist, wofern nicht der Totalindex bei der Akkommodation abnimmt. TSCHERNINGs Annahme, daß der Radius der vorderen Linsenfläche bei einer Akkommodation von 7,5 D. auf 4,8 mm heruntergehen könnte, welche an und für sich in grellem Kontraste zu allen bisherigen ophthalmometrischen Untersuchungsergebnissen steht, würde somit nicht genügen, sondern der Radius müßte noch kleiner werden.

Die zweite Phase der Vorstellungen TSCHERNINGs tritt in der zitierten, in der *Encyclopédie française d'ophthalmologie* enthaltenen Arbeit hervor. Der wesentliche Unterschied liegt darin, daß die früher durch die exakteren Methoden von HELMHOLTZ, MANDELSTAM und SCHÖLER, BLIX unzweideutig bewiesene Abnahme der Tiefe der vorderen Kammer bei der Akkommodation, seitdem dieselbe bei den Untersuchungen BESIOS auch mit den weniger exakten Methoden des Sorbonner Laboratoriums beobachtet wurde, nunmehr anerkannt wird. Demzufolge stellt er sich jetzt den Akkommodationsvorgang so vor, wie es die nach ihm reproduzierte Fig. 142 zeigt, wo die ausgezogene Linie die ruhende, die gestrichelte die 7 Dioptrien akkommodierende Linse darstellt. Auf die

neuen anatomischen Vorstellungen einzugehen, welche es ihm ermöglichen, diese akkommodative Linsenform aus der ruhenden durch Spannung der vorderen Zonulafasern hervorgehen zu lassen, dürfte überflüssig sein, und soll hier nur hervorgehoben werden, daß die Untersuchungen von BESIO, wenn die Fehlerquellen der Methode unbeachtet bleiben, für die Richtigkeit der oben als die erste bezeichnete Annahme im kokainisierten Auge sprechen.

Die dritte Phase der Vorstellungen TSCHERNINGs ist in der *Thomas Young Oration* vor der *Optical Society* in London 1907[1] angedeutet. Die bezügliche Stelle lautet: „v. PFLUGK ist es neuerdings gelungen, die tote Linse in ihrer akkommodativen Form zu fixieren; er hat gefunden, daß die hintere Fläche oft in den peripheren Teilen ein wenig konkav wird. Diese Konkavität nimmt während der Akkommodation zu. Einer meiner Schüler, Dr. ZEEMAN, hat nachher diese Konkavität im lebenden Auge beobachtet."


Fig. 142.

VON PFLUGKs[2] Versuche bestanden in der Gefrierung mit flüssiger Kohlensäure. Die Beweiskraft solcher Versuche dürfte aber nicht sehr hoch geschätzt werden können, da die Einwirkung der sich beim Gefrieren entwickelnden Kräfte nicht überblickt werden kann. FISCHER[3] zeigte auch, daß die Gefriermethode zu zufälligen Formveränderungen der Linse Anlaß geben kann, und hierzu kommt noch, daß der Akkommodationsmechanismus des Vogelauges, wie die oben zitierten Untersuchungen von HESS darlegen, wesentlich verschieden von dem des menschlichen Auges ist. ZEEMANs oben zitierter Befund beweist nur die Gegenwart der Diskontinuitätsfläche. Erst wenn zwei sich in entgegengesetzter Richtung bewegende Bilder gesehen werden, wie ich es beim echten Lenticonus posterior beobachtet habe, ist das Vorhandensein eines nach hinten konkaven Teiles der hinteren Linsenfläche bewiesen.

V. Die monochromatischen Aberrationen des Auges.

Die Realisierung eines wirklich homozentrischen Strahlenbündels bei der Brechung in einem optischen System ist nur in ganz singulären Fällen möglich — dann aber auch nur betreffend des axialen Strahlenbündels in einem Umdrehungssystem — und hat deshalb gar keine Bedeutung für die tatsächliche optische Abbildung. Solange man sich dessen nicht völlig bewußt war, und bevor die Konstitution des allgemeinen Strahlenbündels näher bekannt wurde, hatte man keinen anderen Ausweg, den Bau eines solchen näher zu beschreiben als durch die Abweichungen, Aberrationen, welche den Verlauf eines Strahles von dem idealen, homozentrisch gerichteten, unterscheiden. Je nachdem nun in der Rechnung Größen von verschiedener Ordnung mitgenommen werden,

[1] *The development of the science of physiological optics in the nineteenth century.* Sonderabdruck aus *The optician and photographic trade journal.* Nov. 1, 8 u. 15. 1907.

[2] Über die Akkommodation des Auges der Taube. Wiesbaden 1906.

[3] F. FISCHER. Über Fixierung der Linsenform mittels der Gefriermethode. Arch. f. Augenheilk. LVI. 1907. S. 342.

erhält man verschiedene Werte für die Abweichungen eines Strahles, welche verschiedenen, nunmehr bekannten geometrischen, das Strahlenbündel charakterisierenden Größen entsprechen, so daß von monochromatischen Abweichungen verschiedener Ordnung gesprochen werden kann. Die erste Ordnung wird dabei vom Astigmatismus, die zweite von den Asymmetrienwerten repräsentiert, während nunmehr unter monochromatischer Aberration im engeren Sinne gewöhnlich nur die Abweichungen höherer Ordnung als der ersten — also mit Ausschluß des Astigmatismus — verstanden werden, und die Bezeichnung Aberration schlechthin speziell auf die Abweichungen dritter Ordnung angewendet wird, welche durch die eingangs erwähnten Aberrationswerte bestimmt werden. Die Abweichungen oder Aberrationen höherer Ordnung als der dritten werden in der physiologischen Optik am besten mit eben dieser Bezeichnung angegeben. In der technischen Optik führen sie auf der Achse eines Umdrehungssystems auch den Namen Zonenfehler.

Die schiefe Inzidenz der Visierlinie bedingt im Auge einen geringgradigen inversen Astigmatismus, welcher, obwohl sehr wenig, zur Kompensation des normalen direkten Hornhautastigmatismus beiträgt. Zugleich ergeben sich endliche Asymmetrienwerte längs der Visierlinie, so daß das im Auge gebrochene Strahlenbündel, wenn es auf dieselbe bezogen wird, einfach asymmetrisch ist. Wie die Untersuchungen mit einem leuchtenden Punkte gelehrt haben, ist es aber längs einem anderen Strahle anastigmatisch und ohne Asymmetrie. Es folgt hieraus, da die Strahlenvereinigung längs diesem Strahle von höherer Ordnung und somit für die Abbildung ausschlaggebend ist, daß in bezug auf die Realitäten bei der Abbildung die Asymmetrienwerte des im Auge gebrochenen Strahlenbündels gleich Null sind. Es gibt aber alle möglichen Übergänge zwischen diesem, die am besten gebauten Augen charakterisierenden Zustand und denjenigen Graden der pathologischen Asymmetrie, welche eine bedeutende Herabsetzung der Sehschärfe oder lästige asthenopische Beschwerden verursachen können. Untersucht wird die Asymmetrie teils mit subjektiven, teils auch mit objektiven Methoden. Da erstere dieselben sind, wie sie zu der Untersuchung der Aberration verwendet werden, soll erst weiter unten auf dieselben eingegangen werden. Was die objektiven Methoden betrifft, gilt von den ophthalmoskopischen das nämliche, und es soll somit hier nur die Untersuchung der Asymmetrie der Hornhaut und der pathologischen Dezentration behandelt werden.

Es ist einleuchtend, daß eine vollständige ophthalmometrische Untersuchung der vorderen Hornhautfläche zusammen mit der Ermittelung der Lage der optischen Achse des Auges — beides nach oben ausführlich beschriebenen Methoden — zwar hinreichende Daten ergeben würde, aber auf der anderen Seite wegen der zeitraubenden Arbeit praktisch unanwendbar ist. Man kann auch sehr wohl damit auskommen, daß man in vier Richtungen, welche 10° mit der Visierlinie bilden und auf beiden Seiten derselben in den beiden Hauptschnitten orientiert sind, die ophthalmometrische Untersuchung ausführt und die Lage der optischen Achse bestimmt. Da aber die meisten Fälle von pathologischer oder ungewöhnlich hochgradiger physiologischer Asymmetrie zufälligerweise bei der Refraktionsuntersuchung in der praktischen Tätigkeit des Ophthalmologen entdeckt werden, so braucht man eine einfachere Methode, um hinreichendes Material zu bekommen. Dies erhält man, indem die keratometrische Methode durch eine keratoskopische ersetzt wird.

Bei der Keratoskopie wird die Form der Hornhaut nach der Verunstaltung eines Spiegelbildes geschätzt. Es lehrt nun die Erfahrung, daß diese Schätzung am sichersten ist, wenn das Spiegelbild bei Abwesenheit jeder Deformation ein Quadrat darstellt. Ich habe deshalb der Scheibe, deren Spiegelbild in der Hornhaut beobachtet wird, die in der Fig. 143 reproduzierte Form gegeben. Wenn dieselbe im richtigen Abstande gehalten wird bzw. am Objektivende eines passend fokusierten Fornrohres befestigt ist, so zeigt das in einer sphärischen Fläche entstandene Spiegelbild vier Quadraten, deren Seitenabstand gleich der Seite des kleinsten Quadrates ist. Weicht die Form der Fläche von der sphärischen ab, so wird das Bild entsprechend deformiert, wobei die Abstände der Linien proportional zu den Krümmungsradien der entsprechenden Flächenelemente sind. Das Spiegelbild wird zuerst beim Blick gerade ins Objektiv, dann bei vier anderen, durch Fixationsmarken bezeichneten Blickrichtungen untersucht, nämlich nach oben und unten sowie nach den beiden Seiten, wobei immer in der peripheren Blickstellung die beiden Punkte der Hornhaut, welche die Mittelpunkte der zwei dem Hornhautzentrum am nächsten liegenden Konturen spiegeln, genau dieselben sind, wo beim Blick ins Objektiv die Mittelpunkte der bezüglichen zwei periphersten Konturen gespiegelt werden. Für die beiden Ebenen, in welchen der Blick bewegt wird, ergibt also diese Untersuchung keratoskopisch genau dasselbe, was die oben geschilderte photographische Meßmethode keratometrisch liefert.

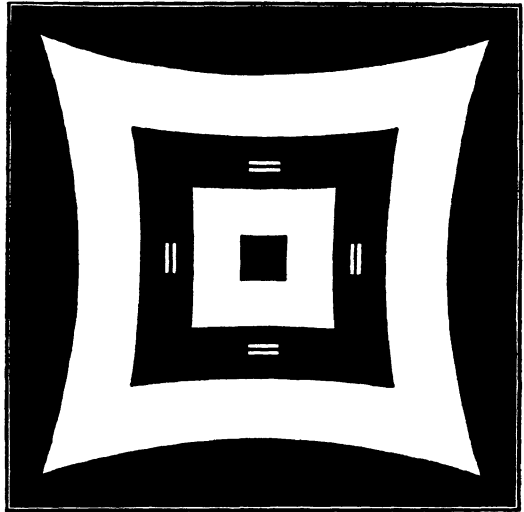


Fig. 143.

Das Aussehen der Spiegelbilder in einer typisch normalen Hornhaut — derselben, deren ophthalmometrische Messung oben angegeben worden ist — zeigt die Gruppe der Fig. 144. Im zentralen Bilde, welches annähernd die optische Zone ausfüllt, sieht man die Vierecke vollkommen regelmäßig, obwohl die oberste Linie von den Zilien beschattet und daher nicht zu sehen ist. Das Bild ist ebensoweit vom oberen wie vom unteren Hornhautrande entfernt, dem inneren aber merklich näher als dem äußeren. Mit der Lupe sieht man auch deutlich, wenigstens an der Platte, daß die Pupille lateralwärts vom Zentrum des Spiegelbildes steht. Die zwei Bilder der oberen und unteren Hornhautpartie sind in bezug aufeinander symmetrisch und deuten eine bedeutende, gegen die Peripherie der Hornhaut zunehmende Abflachung derselben an. An beiden, insbesondere am unteren, ist aus den schiefen Winkeln ersichtlich, daß die betreffende Hornhautpartie nicht um die vertikale Mittellinie des Spiegelbildes symmetrisch ist, sondern daß der Scheitel der Hornhaut — die optische Zone derselben — nach außen vom ophthalmometrischen

Achsenpunkte belegen ist, und an den beiden horizontalen Bildern tritt in Übereinstimmung hiermit die normale horizontale Asymmetrie mit der bedeutend stärkeren Abflachung nach innen zutage. Diese Bilder sind in bezug auf die horizontale Mittellinie ziemlich symmetrisch, doch scheinen sie, insbesondere das äußere, einigermaßen die ophthalmometrisch konstatierte, physiologische, geringe vertikale Asymmetrie anzudeuten. Endlich ist die Pupille in bezug auf ihre horizontale Mittellinie symmetrisch belegen.

Während also in diesem Falle eine deutliche vertikale Asymmetrie nicht konstatiert wird, gibt es aber andere Augen, welche sich betreffs der Funktion als vollkommen normal herausstellen, in welchen aber die keratoskopischen Bilder bedeutende Abweichungen von diesem Typus zeigen. Wenn der Begriff der Asymmetrie und Dezentration auf den ophthalmometrischen Achsenpunkt

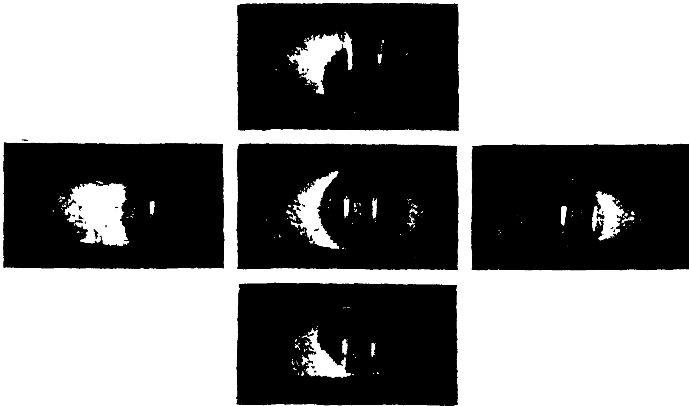


Fig. 144.

bezogen wird, kann man an Augen, welche in klinischer Hinsicht vollkommen normal sind, drei Typen durch folgende Merkmale unterscheiden:

1. In den regelmäßigsten Fällen nur die normale horizontale Asymmetrie.
2. In den weniger regelmäßigen Fällen eine solche Kombination von vertikaler und horizontaler Asymmetrie, daß das Bild einer normalen Asymmetrie in schiefer Richtung entsteht.
3. In unregelmäßigeren Fällen normale Asymmetrie des horizontalen Hornhautschnittes, kombiniert mit ausgeprägter abnormer Asymmetrie des vertikalen, jedoch mit vertikaler Dezentration der Pupille in der Richtung der geringsten Abflachung.

Wie der Übergang von der zweiten zur dritten Gruppe ein allmählicher ist, so kann auch diese nicht scharf vom pathologischen Gebiet abgegrenzt werden, indem Fälle vorkommen, welche mit vertikaler Asymmetrie und kompensierender Pupillendezentration asthenopische Symptome darbieten, welche nach entsprechender Korrektion des gewöhnlich vorhandenen inversen Totalastigmatismus verschwinden. Sicher pathologisch ist die vertikale Asymmetrie der Hornhaut mit entgegengesetzter Pupillendezentration, welche, soweit meine Erfahrung ausreicht, nie vorkommt, ohne daß Asthenopie oder andere krankhafte Symptome oder Myopie vorliegt.

Es empfiehlt sich, die pathologischen Fälle unter dem Namen Asymmetrie oder Dezentration als eine besondere Refraktionsanomalie hinzustellen

Diese umfaßt dann erstens die pathologische vertikale Asymmetrie, welche sich als solche entweder durch die entgegengesetzte Pupillendezentration oder durch einen inversen Totalastigmatismus oder aber durch einen ungewöhnlich großen Unterschied zwischen kornealem und totalem Astigmatismus kenntlich macht. Diese Fälle täuschen sehr oft bei unvollkommener Untersuchung eine geringgradige Myopie vor, welche erst nach Korrektion des unter Umständen schwer zu entlarvenden inversen Astigmatismus schwindet, können deshalb auch als latenter inverser Astigmatismus bezeichnet werden. Nicht ohne Interesse ist, daß TSCHERNINGs Auge, worauf ich weiter unten zurückkomme, eine ungewöhnlich hochgradige vertikale Asymmetrie aufweist, welche jedenfalls auf der Grenze des Pathologischen — wenn nicht jenseits derselben — liegt und als abnorm bezeichnet werden muß.

Zweitens findet man auch eine abnorme horizontale Asymmetrie, wobei in seltenen Fällen eine Steigerung der normalen vorliegt, was aber nur bei großer Pupille Beschwerden verursacht und Gegenstand der Korrektion wird. In anderen Fällen, besonders bei Myopie, kann eine stärkere Abflachung der Hornhaut nach außen als nach innen vorliegen, oder es zeigt die opthalmoskopische und skiaskopische Untersuchung der peripheren Refraktion einen Unterschied von mehreren Dioptrien, je nachdem die Blickrichtung in gleicher Winkeldistanz nasal oder temporal gewählt wird.

Während in den angedeuteten Fällen das im Auge gebrochene Strahlenbündel einfach asymmetrisch sein kann, was auch in der Regel der Fall ist, und deshalb auch gewöhnlich mit richtiger Korrektion eine gute Sehschärfe erhalten wird, so ist dies seltener der Fall bei der schiefen Asymmetrie, da das gebrochene Strahlenbündel dabei oft doppelt asymmetrisch, die kaustische Fläche in Übereinstimmung hiermit ungünstiger gestaltet und die Sehschärfe herabgesetzt ist. Schon das Vorhandensein eines Astigmatismus, dessen Hauptschnitte einen Winkel von 35° bis 55° mit der Horizontalebene bilden, deutet gewöhnlich eine schiefe Asymmetrie an, ebenso wie ein schiefer Winkel zwischen den beiden Richtungen, in welchen die Denivellation bei der ophthalmometrischen Untersuchung der Hornhaut verschwindet oder eine auffällige Inkongruenz zwischen den Hauptschnitten des kornealen und des totalen Astigmatismus.

Die keratoskopische Untersuchung ergibt zwar nur die Asymmetrie der Hornhaut und die Dezentration der Pupille, stellt aber doch ein gutes Mittel dar, um eine Asymmetrie des im Auge gebrochenen Strahlenbündels zu entdecken. Daß bei hochgradiger Asymmetrie das ganze Auge an der Deformation beteiligt ist, zeigt die ophthalmoskopische Untersuchung der Papille des Sehnerven. In den typisch normalen Fällen ist diese um die Horizontallinie symmetrisch, während bei abnormer vertikaler und bei schiefer Asymmetrie sehr oft eine entsprechende Verunstaltung des Sehnervenkopfes — eventuell mit Konusbildung nach unten oder in schiefer Richtung — vorhanden ist, und die perverse Papillenbildung in der Regel eine abnorme horizontale, durch die oben erwähnte ophthalmoskopische und skiaskopische Untersuchung entdeckbare Asymmetrie andeutet.

Während somit die Asymmetrie des im Auge gebrochenen Strahlenbündels praktisch als eine pathologische Erscheinung aufzufassen ist, stellt die Aberration desselben einen physiologischen Zustand dar, wie es auch von vornherein postuliert werden kann, da die Abwesenheit der Aberration einen singulären Fall darstellt, dessen Realisation im Auge nutzlos wäre, indem die Pupillen-

größe den Abweichungen höherer Ordnung eine solche Bedeutung zusichert, daß der Einfluß der Aberration auf der Achse relativ zurücktreten muß. Bei der Untersuchung der Aberration handelt es sich somit darum, die Konstitution eines weit geöffneten Strahlenbündels zu erforschen. Die hierzu geeignetste Methode ist die direkte Untersuchung der Schnitte desselben mit einer Schirmebene, da auf dieser die Schnittlinien der kaustischen Fläche deutlich auftreten, die Form der letzteren somit ermittelt werden kann. Diese Methode ist um so geeigneter, da die Netzhaut eine ausgezeichnete Schirmfläche darstellt, leidet aber nur an dem Mangel, daß sie, als eine subjektive Methode, von der Beobachtungsfähigkeit des Untersuchenden abhängig, demnach auch nicht zur Anwendung auf ein großes Material geeignet ist. Das Strahlenbündel verschafft man sich durch Hinblicken nach einem kleinen, hell leuchtenden Punkte. Die verschiedenen Querschnitte desselben werden wiederum durch Veränderung der optischen Einstellung des Auges unter Vorhalten von Brillengläsern auf die Netzhaut gebracht. Die Methode der vollständigen Durchmusterung der kaustischen Fläche auf diese Weise nenne ich zum Unterschiede von den in der Literatur beschriebenen planlosen Untersuchungen mit einem leuchtenden Punkte die Methode der subjektiven Stigmatoskopie.

Erst durch diese Methode konnte ich die Konstitution des im Auge gebrochenen Strahlenbündels nach Ermittelung der erforderlichen mathematischen Gesetze erforschen, und zwar gibt es auch, seitdem diese Konstitution bekannt geworden ist, keine andere Methode, mit welcher sie vollständig dargestellt werden kann. Ursache hierzu ist die außerordentlich komplizierte Form der kaustischen Fläche, indem nicht nur in einem Meridianschnitte die drei in der Fig. 120 S. 254 dargestellten Spitzen an der Schnittlinie derselben vorhanden sind, sondern die Form dieser Schnittlinie bei der Drehung des Meridianschnittes um die Achse kontinuierlich wechselt, wobei der Abstand der beiden symmetrischen Spitzen von der auf der Achse belegenen abwechselnd Maxima und Minima durchläuft. Entsprechend diesen größten und kleinsten Abständen der Spitzen sind die Kanten der zweiten kaustischen Fläche angeordnet, so daß, was diesen Wechsel betrifft, eine Analogie mit dem Diagonalastigmatismus der Aberration besteht — mit dem Unterschiede jedoch, daß hier nur zwei Maxima und Minima vorhanden sind, während im Auge die Zahl eine größere ist. Daß die Form der Querschnitte der kaustischen Fläche schon beim Diagonalastigmatismus der Aberration ziemlich kompliziert ist, geht aus dem in der Fig. 145 dargestellten Querschnitte eines solchen Strahlenbündels hervor, welches durch eine passend zusammengesetzte bizylindrische Lupe[1] erhalten worden ist. Den strahlenförmigen Ausbuchtungen des Schnittes entsprechen die Meridianschnitte, in welchen die Aberration ihr Maximum erreicht, während die hellen Linien in den zwischenliegenden Ecken die Schnitte der in Kanten umgebogenen zweiten kaustischen Fläche darstellen. Wie durch partielle Zudeckung der erzeugenden Linse dargelegt werden kann, entstehen erstere durch Lichtstrahlen, welche die Achse gekreuzt haben, letztere dagegen durch Strahlen, welche die Achse erst in größerer Entfernung von der Lupe kreuzen.

Die subjektive Stigmatoskopie ergibt nun für das im Auge gebrochene Strahlenbündel eben dieselbe Eigentümlichkeit, obwohl die strahlenförmigen

---

[1]) A. Gullstrand, Demonstration eines Instrumentes zur Erzeugung von Strahlengebilden um leuchtende Punkte. Ber. ü. d. XXX. Vers. d. Ophth. Gesellsch. Heidelberg 1902.

Ausbuchtungen und die zwischenliegenden hellen Lichtflecke zahlreicher und nicht immer vollkommen regelmäßig angeordnet sind. Wie schon aus der Beschreibung von Helmholtz hervorgeht, verschwinden die um einen hellen Punkt sichtbaren Strahlen von derselben Seite her, von welcher die Pupille durch Vorschieben eines Schirmes partiell zugedeckt wird. Da das Bild der Strahlenfigur umgekehrt im Verhältnis zur Zerstreuungsfigur auf der Netzhaut erscheint, so sind die Strahlenbildungen durch Lichtstrahlen entstanden, welche sich vor der Netzhaut gekreuzt haben. Dasselbe wird, wie Helmholtz anführt, durch die chromatischen Erscheinungen bewiesen und tritt bei der Anwendung eines Kobaltglases besonders deutlich hervor, indem der zentrale helle Punkt purpurn, die Strahlenbildungen blau gesehen werden. Diese Strahlen sieht man, wie Helmholtz angibt, bei hinreichend hellem Lichtpunkte auch bei schärfster Einstellung des Auges, sobald die Pupille nicht durch die im Zimmer herrschende Beleuchtung übermäßig verengert ist. Macht man die vollständige stigmatoskopische Untersuchung unter Anwendung eines leuchtenden Punktes, dessen Durchmesser 2 mm, dessen Abstand 4 m beträgt, indem man mit einer durch vorgesetzte Brille erzielten Refraktion von 4 D Myopie beginnt und die Refraktion des bewaffneten Auges durch wiederholtes Wechseln der Brille von halber zu halber Dioptrie unter Erschlaffung der Akkommodation successive vermehrt, so sieht man zunächst einen hellen Zerstreuungskreis, welcher zwar von helleren Punkten gestichelt erscheinen kann, aber keine deutlich helleren Teile von dunkleren abgrenzen läßt. Die beim Hinausrücken des Fernpunktes eintretende Veränderung zeigt sich dann zunächst darin, daß in der Mitte ein mehr oder weniger regelmäßiger heller Punkt auftritt, um welchen dann die Strahlenbildungen sichtbar werden. Dieser Querschnitt des Strahlenbündels ist von Helmholtz in der Fig. 72 b S. 161 dargestellt. Die dortselbst bei *a* reproduzierte Figur, welche aus seinem rechten Auge stammt, ist für die Demonstration der einfachsten Fälle weniger geeignet, da aus derselben eine — möglicherweise durch eine punktförmige Linsentrübung bedingte — vertikale Asymmetrie der optischen Zone hervorgeht, welche die Deutung etwas erschwert. Die dem linken Auge entsprechenden Zeichnungen *b* und *d* deuten zwar nicht eines der am regelmäßigsten gebauten Augen an, sind aber hinreichend typisch, um zur Demonstration verwendet werden zu können. In den bestgebauten Augen ist

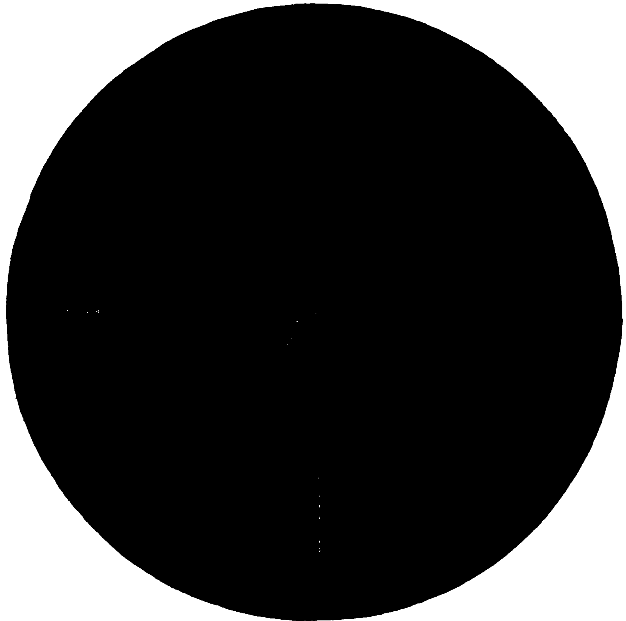


Fig. 145.

die Figur achtstrahlig und hat die Grundform eines vertikal gestellten Kreuzes mit diagonalen Strahlen, von welchen jedoch der eine oder andere in zwei gespaltet sein kann. Wie ersichtlich, läßt sich die Figur von HELMHOLTZ als eine Variante dieser Form bei schief stehendem Kreuze deuten. Wird durch Vermehrung der Refraktion der Fernpunkt des bewaffneten Auges immer mehr hinausgerückt und virtuell gemacht, so sieht man ein dunkleres Zentrum, das von einer helleren zackigen Linie umgeben ist. Die Zacken dieser Linie, welche bei größerer Pupille in Strahlenform verlängert erscheinen, verschwinden auf der entgegengesetzten Seite, wenn die Pupille von einer Seite her zugedeckt wird, und leuchten im Versuche mit dem Kobaltglas rot, werden also von Lichtstrahlen erzeugt, die den zentralen Strahl nicht vor Erreichung der Netzhaut geschnitten haben. An Zahl überwiegen diese Strahlenbildungen die in der gewöhnlichen Sternfigur sichtbaren, und was die Orientierung betrifft, kann man mit Sicherheit konstatieren, daß sie nicht mit derjenigen in der gewöhnlichen Sternfigur übereinstimmt, sondern daß im Gegenteil in denjenigen Richtungen, in welchen deutliche Strahlen der gewöhnlichen Sternfigur wahrgenommen werden, bei der letztgenannten Einstellung keine Strahlen vorkommen. Bei künstlich dilatierter Pupille kann man bei gewisser Einstellung die beiden Arten von Strahlenbildungen auf einmal sehen und das Alternieren derselben konstatieren. Die zu Strahlen verlängerten Zacken sind von HELMHOLTZ in der Fig. 72d wiedergegeben worden, wo man das dunklere Zentrum deutlich sieht und auch meine Angabe über die Orientierung verifizieren kann. Daß die Zahl der Zacken bei HELMHOLTZ in diesem Schnitte des Strahlenbündels geringer ist als in dem bei *b* dargestellten, beruht darauf, daß er die verschiedenen Querschnitte des Strahlenbündels nicht durch Vorsetzen von Brillen, sondern durch Wechseln des Abstandes des leuchtenden Punktes erzielt hat. Bei der Annäherung desselben an das Auge wird nämlich der Gesichtswinkel, unter welchem er gesehen wird, zu groß, so daß die einander am nächsten liegenden Zacken zusammenfließen.

Der in der Fig. 145 dargestellte Querschnitt eines Strahlenbündels mit diagonalastigmatischer Aberration zeigt sowohl die der gewöhnlichen Sternfigur im Auge entsprechenden Strahlen, wie die der zackigen Linie entsprechenden zwischen den Strahlen orientierten Ecken mit helleren radiär gerichteten Lichtflecken. Ein solcher Querschnitt entsteht, wenn die Wellenfläche eine gewisse Gleichung vierten Grades und vier Symmetrieebenen hat. Bei veränderter Zusammensetzung der zur Erzeugung angewendeten bizylindrischen Kombination kann die Symmetrie verloren gehen, wobei sehr komplizierte Erscheinungen auftreten. Hat aber die Wellenfläche des Strahlenbündels eine Gleichung achten Grades von entsprechender Form und acht Symmetrieebenen, so entstehen acht Strahlen, und an Stelle der vier in der Figur sichtbaren Ecken acht Ausbuchtungen mit helleren, radiär gerichteten Mittellinien, wobei, wenn die Symmetrie um die erwähnten acht Ebenen nicht vollständig ist, scheinbare Unregelmäßigkeiten in der Anordnung der Strahlen und Ausbuchtungen auftreten, welche auf der komplizierteren Gestalt der kaustischen Fläche beruhen. Wenn man nun noch bedenkt, daß im Sehorgan die Kontraste vermehrt werden, indem das Minimum perceptibile in der Umgebung eines hell beleuchteten Netzhautpunktes herabgesetzt wird, so daß die Ausbuchtungen wegen der helleren Mittelpartien als Zacken erscheinen müssen, so wird man einsehen, daß die Erscheinung der Strahlenfiguren im Auge keineswegs auf

wirkliche Unregelmäßigkeiten hindeuten, wie sie etwa durch Kanten oder Spitzen an den brechenden Flächen bzw. durch Diskontinuitäten in der Indexvariation in der Linse bedingt werden könnten, sondern eine ebenso regelmäßige Erscheinung darstellen, wie überhaupt eine jede, die durch eine Gleichung achten oder höheren Grades geregelt wird.

Die Wellenfläche eines solchen Strahlenbündels ist, wie die mathematische Untersuchung lehrt, dadurch charakterisiert, daß ihre Abflachung nach der Peripherie hin in verschiedenen Meridianschnitten verschiedene Werte hat und ebenso viele den Strahlen entsprechende Minima wie den Zacken entsprechende Maxima aufweist. Schneidet man eine solche Fläche mit einer Zylinderfläche ab, deren Achse mit dem axialen Strahle zusammenfällt, so zeigt die Schnittlinie nach Ausrollen des Zylinders auf einer Ebene einen wellenförmigen Verlauf, welcher um so stärker ausgeprägt ist, je weiter ab vom Zentrum der Schnitt liegt. Die Fläche ist also mit radiär verlaufenden, nach dem Zentrum hin immer flacher werdenden Erhebungen und Vertiefungen versehen, welche als eine Art „Faltenbildungen" bezeichnet werden können, wenn man sich bloß stets daran erinnert, daß hiermit nur eine Analogie angedeutet ist. Diese Beschaffenheit der Wellenfläche kann nur durch eine ähnliche Beschaffenheit der Oberflächen oder der Isoindizialflächen der Linse verursacht werden, da die Sternfigur um einen leuchtenden Punkt nach Entfernung der Linse aus dem Auge verschwindet. An den Linsenflächen müßte sich diese Form durch entsprechende springende Bewegungen der Spiegelbilder bei Bewegungen des Auges kenntlich machen. In der Tat können manchmal solche Bewegungen des Spiegelbildes in der vorderen Linsenfläche gesehen werden. Da dies aber, soweit ich ermitteln konnte, nur in der Peripherie der Fall ist, was zur Erklärung nicht ausreichen würde, und da übrigens die Undeutlichkeit des fraglichen Spiegelbildes seine Entstehung nicht nur in der vorderen Linsenfläche, sondern auch in den vordersten Teilen der Linsensubstanz beweist, so müssen mit Notwendigkeit die Isoindizialflächen der Linse den entsprechenden Bau haben. Zu demselben Schluß führen die Gesetze der Dioptrik der Linse unter Berücksichtigung des anatomischen Baues derselben. Da nämlich die Isoindizialflächen bei der akkommodativen Formveränderung konstante Volumina einschließen müssen, so würden sie bei den verschiedenen optischen Einstellungen des Auges einen verschiedenen Flächeninhalt haben, wenn sie Umdrehungsflächen darstellten. Dies würde aber nur möglich sein, wenn entweder die Linsenteilchen frei verschieblich wären, oder aber die Linsensubstanz eine bedeutende Elastizität besäße. Da weder das eine noch das andere zutrifft, so ist es unmöglich, daß die Isoindizialflächen bei verschiedener Form Umdrehungsflächen seien, sondern die Formveränderung derselben muß von der Entstehung von „Faltenbildungen" bzw. von der Veränderung solcher begleitet sein. Wegen der die Akkommodation begleitenden Pupillenverengerung ist eine solche Veränderung schwer in einwandfreier Weise mit der subjektiven Stigmatoskopie zu untersuchen. Bei der im ersten Stadium der Eserinwirkung auf die mit Homatropin dilatierte Pupille zustande kommenden Akkommodation ist es aber leicht zu konstatieren, daß eine Veränderung stattfindet.

Das Entstehen der Sternfigur in den Isoindizialflächen der Linse und ihre akkommodative Veränderung beweist offenbar, daß die fragliche Beschaffenheit dieser Flächen durch die Zonularspannung beeinflußt wird. Daß dieselbe nicht durch den anatomischen Bau der Linse, wie er durch die embryonale Anlage

mit drei Strahlen bestimmt wird, bedingt werden kann, geht aus der Zahl und Anordnung der Strahlen hervor, indem die Sternfigur in den regelmäßigsten Fällen achtstrahlig ist, und die Grundform derselben ein Kreuz mit diagonalen Strahlen darstellt. Dagegen gibt es im Aufhängeapparat der Linse eine anatomische Anordnung, welche in den verschiedenen Meridianebenen abwechselnde Maxima und Minima der Zonularspannung bedingen muß, indem nicht nur verschiedene mechanische Verhältnisse enstprechend den Ciliarfortsätzen und deren Interstitien obwalten, sondern auch durch die Kreuzung der zur vorderen und zur hinteren Linsenkapsel gehenden Zonulafasern bedingt werden müssen. Die Zahl dieser Maxima und Minima ist zwar bedeutend größer als die Zahl der Strahlen der Sternfigur, aber da die Spannung nicht in den verschiedenen Maximis mathematisch genau dieselbe sein kann, so werden die Kraftlinien gegen das Zentrum hin zusammenfließen müssen, wie sich auch die Strahlen der Sternfigur oft in einem gewissen Abstande vom hellen Punkte bei größerer Pupille sichtbar teilen. Da die Linse aus Fasern aufgebaut ist, so wird sich die eigentümliche Form der Isoindizialflächen in einer entsprechenden Anordnung der Fasern kundgeben müssen. Es ist dann auch wahrscheinlich, daß beim stetigen Wachstum der Linse die anatomische Anordnung der Fasern von den vorhandenen Spannungsverhältnissen beeinflußt wird, so daß die an der Vorderfläche der Linse bei schiefer Beleuchtung sichtbare Sternfigur diese unter dem Einfluß der Zonularspannung erworbene Struktur darstellen mag. Man sieht diese Sternfigur am besten bei dilatierter Pupille unter Anwendung derselben Versuchsanordnung wie zur Beobachtung des in der vorderen Linsenfläche entstehenden Spiegelbildes, wenn das Licht mit einer Lupe auf die vordere Linsenfläche konzentriert wird. Ob diese Figur wirkliche Diskontinuitäten der Indexvariation angibt, läßt sich aber wohl kaum ohne eine sehr komplizierte mathematische Analyse entscheiden, da die „Faltenbildungen“ der Isoindizialflächen a priori geeignet erscheinen, das fragliche Reflexionsphänomen hervorzurufen.

Die eben bewiesene Eigenschaft der Wellenfläche des im Auge gebrochenen Strahlenbündels macht es mathematisch unmöglich, daß eine glatte Schnittlinie der kaustischen Fläche in der Form eines zur Pupille konzentrischen Kreises auf irgend einem Querschnitte vorhanden sein könne, sondern diese Schnittlinie muß überall zackig deformiert sein oder durch einzelne nicht miteinander zusammenhängende Punkte repräsentiert werden. Die oben beschriebene zackige Linie stellt demnach die Schnittlinie der kaustischen Fläche dar, die im Anfang der stigmatoskopischen Versuchsanordnung sichtbare Lichtkonzentration im Zentrum ist wiederum die Spitze derselben Fläche. Es ist hierdurch bewiesen, daß die Aberration längs der Achse positiv ist, da die Spitze in der Richtung der Lichtbewegung schaut. Wird die stigmatoskopische Untersuchung bei dilatierter Pupille weiter fortgesetzt, indem die Hypermetropie des bewaffneten Auges immer vermehrt wird, so findet man, daß am letzten Schnitte des Strahlenbündels, auf welchem die Schnittlinie der kaustischen Fläche noch sichtbar ist, dieselbe nicht mit der Begrenzungslinie zusammenfällt. Hierdurch ist der Beweis erbracht worden, daß eine Schnittlinie der kaustischen Fläche mit einer Meridianebene die in der Fig. 120 S. 254 dargestellte Form mit drei Spitzen hat, indem die beiden symmetrischen Spitzen die der betreffenden Meridianebene entsprechenden, bei der stigmatoskopischen Untersuchung zuletzt sichtbaren Zacken repräsentieren. Durch Messung des Refraktionsunterschiedes

zwischen diesem Schnitte des Strahlenbündels und demjenigen, welcher die auf der Achse belegene Spitze enthält, findet man den Abstand der beiden Schnitte voneinander. Der Refraktionsunterschied ist bei mir 4 Dioptrien, und scheint überhaupt nie diesen Wert zu untersteigen. Daß bei der Untersuchung weniger geübter Personen manchmal ein höherer Wert erhalten wird, kann auf eine mangelnde Fähigkeit, die Akkommodation vollständig zu entspannen, zurückgeführt werden. Der Durchmesser der den symmetrischen Spitzen der Fig. 120 entsprechenden Linie $R = 0$ wird durch das vor das Auge gehaltene Diaphragma gemessen, welche die zackige Schnittlinie der kaustischen Fläche in ihrem dem brechenden Apparate am nächsten liegenden Schnitte mit der Begrenzungslinie des Strahlenbündelquerschnittes zusammenfallen läßt. Ich habe auf diese Weise einen Durchmesser von 4 mm gefunden. Wird derselbe mit d, der in Rechnung zu ziehende Refraktionsunterschied mit D, die hintere Brennweite des Auges mit f und der Brechungsindex des Glaskörpers mit n bezeichnet, so ergibt sich der Aberrationswert aus der Formel

$$A = \frac{8 f^4 D}{1000 n d^2},$$

in welche der Refraktionsunterschied in Dioptrien einzusetzen ist, sonst aber der Millimeter die Längeneinheit darstellt. Benutzt man in dieser Formel die Brennweite und den Brechungsindex des reduzierten Auges von Donders — 20 mm bzw. $^4/_3$ —, so erhält man einen Aberrationswert von 240 mm, während der für dieses Auge berechnete Aberrationswert, wenn die brechende Fläche sphärisch ist, 540 mm beträgt. Die Größe des für das lebende Auge gefundenen Aberrationswertes ergibt unmittelbar, daß das im Auge gebrochene Strahlenbündel beim Durchgang durch die Linse eine positive Aberration erwirbt, was ich am Helmholtzschen schematischen Auge dadurch konstatieren konnte, daß in demselben, wenn den Linsenflächen eine solche Form gegeben wird, daß ein einfallendes aberrationsfreies Strahlenbündel auch nach der Brechung aberrationsfrei bleibt, der Wert 162 mm für emmetropische Einstellung und bei sphärischer Form der Hornhaut erhalten wird. Der Schluß, den ich aus dieser Tatsache zog, nämlich, „daß der variable Brechungsindex der Linse wenig für die axiale Strahlenbrechung im Auge bedeutet, wonach diese Beschaffenheit der Linse wahrscheinlich hauptsächlich für die Formveränderung bei der Akkommodation, möglicherweise auch für das periphere Sehen, ihre Bedeutung hat“, wird durch die Dioptrik der Linse vollauf bestätigt und zugleich dahin erweitert, daß die Schichtung der Linse nur im Dienste der Formveränderung bei der Akkommodation besteht, da, wie oben bewiesen wurde, der Astigmatismus eines schief durchgehenden Strahlenbündels durch dieselbe erhöht wird.

Setzt man wiederum die hintere Brennweite des exakten schematischen Auges und den Brechungsindex des Glaskörpers in obenstehende Formel ein, so ergibt dieselbe einen Aberrationswert von 403,5 mm, und wenn man mit den von mir angegebenen Formeln den Aberrationswert des exakten schematischen Auges mit der reellen Kernlinse berechnet, so erhält man

$$A = 691{,}17 + 75854\,\Phi_1 - 7511{,}5\,\Phi_2 + 6113{,}9\,\Phi_3 - 3264{,}4\,\Phi_4,$$

wo die Werte Φ die Abflachungswerte der vier brechenden Flächen darstellen und durch die Gleichung

$$\Phi = -\frac{3\,\varepsilon^2}{\varrho^3}$$

erhalten werden, in welcher ϱ den Krümmungsradius bezeichnet und ε die Exzentrizität der Fläche zweiten Grades angibt, welche eine Berührung vierter Ordnung mit der betreffenden brechenden Fläche hat. Beim Vergleiche dieses für das exakte schematische Auge berechneten Wertes mit dem durch die Untersuchnng des lebenden Auges unter Anwendung der Brennweite desselben und des Brechungsindex des Glaskörpers erhaltenen Aberrationswerte 403,5 mm, hat man zu berücksichtigen, daß die Gleichung, aus welcher letzterer Wert erhalten wird, nur approximativ ist, indem der Einfluß der Aberrationswerte höherer Ordnung nicht berücksichtigt werden kann. Da nun aber eine Linie $R = 0$ vorhanden ist, so müssen diese Werte negativ sein, und es folgt hieraus, daß der aus dem Untersuchungsergebnisse für das lebende Auge berechnete Aberrationswert zu klein ist. Um wieviel er zu klein ist, läßt sich nicht abschätzen noch durch Untersuchungen ermitteln. Nimmt man aber an, daß der hierdurch entstehende Fehler dadurch kompensiert wird, daß für die Brechung in der Hornhaut bei der Berechnung im schematischen Auge das HELMHOLTZsche Ellipsoid angewendet wird, wodurch auch im schematischen Auge der berechnete Wert kleiner und dementsprechend der Einfluß negativer Aberrationswerte höherer Ordnung in Rechnung gezogen wird, so ergibt sich, wenn die Linsenflächen als parabolisch angesehen werden, und für die Hornhaut die Exzentrizität $\varepsilon = 0{,}551$ eingeführt wird, welche MATTHIESSEN, wie oben angegeben wurde, für die von mir gemessene Hornhaut berechnet hat, der Aberrationswert 476,16 mm. Wenn man dann noch in Betracht zieht, daß die Linsenflächen wahrscheinlich eine stärkere periphere Abflachung haben als das Paraboloid, und daß die periphere Dickenzunahme der Hornhaut einen positiven Wert von Φ für die hintere Hornhautfläche andeuten kann, wodurch der berechnete Wert noch weiter sinken würde, so findet man, daß die Übereinstimmung des für das exakte schematische Auge berechneten Wertes mit dem durch die Untersuchung am lebenden Auge ermittelten nicht besser sein könnte.

Dies ist von um so größerer Bedeutung, als dadurch die Berechtigung konstatiert wird, das Gesetz von MATTHIESSEN längs der Achse der Linse anzuwenden. Der größte Teil der Aberration entsteht nämlich, wie die Rechnung lehrt, in der Linse und hängt von dem Werte von p_n ab. Dieser Wert kann wiederum nur dadurch kleiner gemacht werden, daß längs der Achse eine hyperbolische Indizialkurve angenommen wird, was aber mit den Ergebnissen aller refraktometrischen Untersuchungen im Widerspruch steht. Eine Erhöhung des Wertes von p_n würde wiederum eine noch größere positive Aberration im schematischen Auge zur Folge haben, welche nach dem Obenstehenden wohl sehr unwahrscheinlich erscheinen muß.

Ich habe das von der Linie $R = 0$ umschlossene Gebiet der Pupille die optische Zone derselben genannt, welcher Name um so berechtigter erscheinen dürfte, als diese Zone annähernd mit dem durch die optische Zone der Hornhaut begrenzten Gebiete zusammenfällt. Innerhalb dieser Zone ist die Aberration des normalen Auges immer positiv, und dieselbe kann durch die Refraktion des Auges in den verschiedenen Punkten der Pupille veranschaulicht werden, indem die Refraktion überall geringer ist als im Zentrum, und der Unterschied beim Fortschreiten längs einer Meridianlinie vom Zentrum aus anfangs rascher,

dann etwas langsamer steigt, um an der Grenzlinie 4 Dioptrien zu betragen. Hierbei hat man sich aber zu erinnern, daß nach der befolgten Nomenklatur die myopische Refraktion negativ ist, und daß unter der Refraktion in einem Punkte der Pupille der Refraktionszustand verstanden wird, welchen das Auge besitzen würde, wenn in diesem Punkte eine unendlich kleine Blende vorhanden wäre. Diese Refraktion wird somit durch die Schnittweite des betreffenden Strahles mit nächstliegenden Strahlen, nicht mit der Achse, bestimmt. Innerhalb der optischen Zone besteht längs jedem Strahle, die Achse ausgenommen, Astigmatismus, indem die meridionale Schnittweite kürzer ist als die äquatoreale. Folgt man einer Meridianlinie außerhalb der Grenze der optischen Zone, so nimmt der Astigmatismus längs den diese Linie schneidenden Strahlen stetig ab und erreicht den Wert Null in demselben Augenblick, wo man auf denjenigen Strahl gekommen ist, welcher die kaustische Fläche im Schnittpunkte mit der optischen Achse berührt. Zieht man in der dilatierten Pupille sämtliche solche Strahlen, so bilden dieselben, wenn von den „Faltenbildungen“ der Wellenfläche abgesehen wird, eine konische Fläche, deren Spitze auf der Achse liegt. Da nun längs jedem dieser Strahlen eine vollständige Strahlenvereinigung erster Ordnung stattfindet, so besteht in der auf der Achse belegenen Spitze der konischen Fläche eine Strahlenvereinigung von außerordentlicher Güte, so daß sich auf einem Querschnitte des Strahlenbündels dieser Punkt scharf von der Umgebung abhebt. Dieser Punkt dient deshalb der Abbildung im Auge beim Sehen mit großer Pupille, indem auf den betreffenden Querschnitt eingestellt wird. Durch die subjektive Stigmatoskopie kann man sich sehr leicht davon überzeugen, daß die scharfe Einstellung bei dilatierter Pupille auf einem dem brechenden System näher belegenen Querschnitte des Strahlenbündels zustande kommt als bei mäßiger Pupillengröße. Im ersteren Falle sieht man nämlich, wenn man möglichst scharf auf den leuchtenden Punkt akkommodiert, nur solche Strahlen um denselben herum, welche mit dem Kobaltglas rot leuchten, und welche bei partieller Zudeckung der Pupille von der entgegengesetzten Seite her schwinden, während man, wenn der Fernpunkt durch Konvexgläser etwas näher dem Auge verlegt wird, die gewöhnlichen bei scharfer Akkommodation und mäßiger Pupillengröße sichtbaren Strahlen sieht. Nähert man bei dilatierter Pupille den Fernpunkt dem Auge, bis man die Spitze der kaustischen Fläche sieht, so kann man auch die Schnittlinie des umgebogenen Teiles derselben sehen, indem ein deutlicher, zackiger, heller Ring die Begrenzungslinie bildet.

Bei dieser Darstellung der Strahlenvereinigung mußte ich, um dieselbe verständlicher zu machen, von der durch die „Faltenbildungen der Wellenfläche“ charakterisierten Eigenschaft des Strahlenbündels absehen. Dieselbe bedingt eine Verschiedenheit des Aberrationswertes in verschiedenen Meridianebenen. Aus der Untersuchungsmethode geht es aber hervor, daß die gemessene Aberration den Maximalwert derselben ausmacht. Eine Methode, den Minimalwert zu messen, habe ich nicht ausfindig machen können, sondern man muß sich bis auf weiteres mit der Kenntnis begnügen, daß in den entsprechenden Meridianebenen der Aberrationswert geringer und der Punkt vorteilhaftester Strahlenvereinigung weiter entfernt vom brechenden System belegen ist. Der Abstand dieses Punktes von der Spitze der kaustischen Fläche ist dementsprechend kleiner, und ein durch denselben gehender Strahl schneidet die Pupille in einem ihrem Zentrum näher belegenen Punkte, so daß dieser Punkt des Strahlen-

bündels bei einer die optische Zone nicht überschreitenden Pupillengröße zur scharfen Abbildung verwendet wird, während es nicht ausgeschlossen erscheint, daß bei minimalster Pupille auf einen der Spitze der kaustischen Fläche noch näher liegenden Querschnitt des Strahlenbündels eingestellt werden kann.

Bei der stigmatoskopischen Untersuchung kann man den Refraktionsunterschied zwischen dem Punkte vorteilhaftester Strahlenvereinigung und der Spitze der kaustischen Fläche messen. Ich erhalte auf diese Weise einen Unterschied von 1,5 Dioptrien, welcher somit den Grad der Hypermetropie angibt, welche längs der Achse eines bei mäßiger Pupillengröße emmetropischen Auges besteht. Da aber die Messungen nicht allzu genaue Resultate ergeben, habe ich im schematischen Auge den Wert von 1 D. angewendet, von dem ich mit Bestimmtheit sagen kann, daß er nicht zu groß ist. Der Unterschied der optischen Einstellung des Auges bei mäßiger und bei maximaler Pupille kann auf oben angegebene Weise einwandfrei konstatiert werden, während die klinische Untersuchung der Refraktion mit der Dondersschen Methode zwar in vielen, aber wegen der die Pupillenerweiterung folgenden Herabsetzung der Sehschärfe nicht in allen Fällen, eine geringe Myopie des emmetropischen Auges bei Dilatation der Pupille zutage treten läßt.

Aus dem Gesagten ist es ersichtlich, daß unter Aberration des im Auge gebrochenen Strahlenbündels nur der in den betreffenden Meridianschnitten vorhandene Maximalwert derselben verstanden werden kann. Wie die genauere Untersuchung lehrt, besteht in der Regel ein Astigmatismus dieser Aberration, welcher sich durch eine querovale Gestalt der Schnittlinie der kaustischen Fläche mit der Netzhaut kund gibt, wie sie auch in der Fig. 72d S. 161 von Helmholtz zutage tritt. Der Einfluß desselben auf die Strahlenbrechung bedingt es, daß die maximale Sehschärfe nicht bei vollkommenem Anastigmatismus längs dem zentralen Strahle erhalten wird, ist aber praktisch von ganz untergeordneter Bedeutung. Außerdem lassen sich mit der subjektiven Stigmatoskopie die Asymmetrien und Dezentrationen auch in sehr geringen Graden untersuchen. In meinem rechten Auge sind an dem auf die Netzhaut fallenden Strahlenbündel keine Zeichen der durch die schiefe Inzidenz der Visierlinie entstandenen horizontalen Asymmetrie aufzufinden, wonach die Asymmetrienwerte zwar nicht längs dem durch das anatomische Zentrum der Pupille, wohl aber längs dem durch das Zentrum der Austrittspupille gehenden Strahle gleich Null sind. Wird der die Spitze der kaustischen Fläche berührende Strahl, welcher für die Abbildung maßgebend ist, nach der oben angegebenen Nomenklatur als *der zentrale Strahl* bezeichnet, und nennt man den Punkt, wo dieser Strahl die Pupillenebene schneidet, das *optische Zentrum* derselben, so liegt somit bei mir dieses optische Zentrum in der vertikalen Mittellinie der Austrittspupille, und es stellt die vertikale Mittellinie der Pupille mit einer für praktische Zwecke hinreichenden Genauigkeit eine Symmetrielinie dar. Nicht so die horizontale. Denn schon in der gewöhnlichen, um einen leuchtenden Punkt sichtbaren Strahlenfigur ist eine vertikale Asymmetrie erkennbar, indem die nach oben gehenden Strahlen kürzer erscheinen, als die nach unten sichtbaren. Wenn betreffs einer vertikalen Asymmetrie die Richtung nach oben als die positive gewählt wird, so besteht hiernach längs dem durch das Zentrum der Pupille gehenden Strahl eine direkte negative Asymmetrie des im Auge gebrochenen Strahlenbündels, was damit gleichbedeutend ist, daß *das optische Zentrum der Pupille oberhalb des anatomischen* liegt, wie es auch bei

Abwesenheit einer vertikalen Dezentration der Pupille in bezug auf den ophthalmometrischen Achsenpunkt a priori postuliert werden kann, wenn die asymmetrische Abflachung des vertikalen Hornhautschnittes nicht durch irgend einen entgegengesetzt wirkenden Mechanismus kompensiert ist. Ebenso wie bei der keratoskopischen und ophthalmometrischen Untersuchung der ophthalmometrische Achsenpenkt als fix bezeichnet wird, empfiehlt es sich bei der stigmatoskopischen das optische Zentrum der Pupille bei der Bezeichnung „Dezentration" als Ausgangspunkt zu benützen, so daß die konstatierte vertikale Asymmetrie eine Dezentration der Pupille nach unten darstellt. Diese normale vertikale Dezentration kann alle Grade erreichen, bis das optische Zentrum am Rande der mittelgroßen Pupille oder gar außerhalb derselben liegt, wobei die Grenze des physiologischen Gebietes überschritten wird. Die Zeichnungen, welche TSCHERNING[1] von den Erscheinungen in seinem Auge gegeben hat, zeigen eine solche, mit Sicherheit in der Nähe dieser Grenze belegene, jedenfalls abnorm starke, vertikale Dezentration an.

Außer dieser Dezentration der Pupille hat man auch mit einer Dezentration der optischen Zone zu rechnen. Jene wird aus dem Längenverhältnis der nach oben und nach unten auf dem die Spitze der kaustischen Fläche enthaltenden Querschnitte des Strahlenbündels sichtbaren Strahlen berechnet, diese aus dem Unterschied der Refraktion beim Sichtbarmachen der verschiedenen Teile der der Linie $R = 0$ entsprechenden Kante der kaustischen Fläche. In meinem Auge besteht ein Unterschied von 1 D. zwischen dem oberen und dem unteren Teile dieser Kante. Die daraus berechnete Dezentration der optischen Zone beträgt in meinem rechten Auge $^1/_8$ mm in der Richtung nach unten und deckt sich ungefähr mit der Dezentration der Pupille in derselben Richtung, welche bei einem Durchmesser von 6 mm den Wert von $^1/_7$ mm erreicht.

Den Übergang von dieser physiologischen Dezentration der optischen Zone zu der pathologischen bin ich nicht in der Lage gewesen, durch stigmatoskopische Untersuchungen zu verfolgen, da diese Untersuchungen eine ziemliche Übung erfordern und große Zeitverschwendung mit sich führen. In den Fällen mit vertikaler Asymmetrie der Hornhaut und entgegengesetzter Pupillendezentration dürfte mit größter Wahrscheinlichkeit die Pupille auch in bezug auf das optische Zentrum derselben die entgegengesetzte Dezentration aufweisen und bei mittelgroßer Pupille keine geschlossene Linie $R = 0$, mithin keine optische Zone in derselben vorhanden sein. Schon im Auge von TSCHERNING fehlt bei der Pupillengröße, bei welcher er die Zerstreuungsfiguren gezeichnet hat, eine geschlossene Linie $R = 0$ und es geht aus den Zeichnungen nicht hervor, daß überhaupt eine optische Zone in der Pupille vorhanden wäre. Würde in einem solchen Auge die vertikale Asymmetrie der Hornhaut vermehrt werden, so würde der direkte Asymmetrienwert in vertikaler Richtung wegen der nach der Peripherie hin zunehmenden Abflachung der Hornhaut in höherem Grade längs einem durch den oberen Teil als längs einem durch den unteren Teil der Pupille gehenden, in der vertikalen Symmetrieebene belegenen Strahl zunehmen. Der Einfluß der Aberration müßte dann gegenüber dem der Asymmetrie noch mehr zurücktreten, und eine bessere Strahlenvereinigung längs einem durch den unteren Teil der Pupille gehenden Strahle resultieren. Die

[1] a. a O. *Encyclopédie française d'ophthalmologie.* T. III. S. 207.

Dezentration der Pupille nach oben in einem solchen Auge würde dann die Strahlenvereinigung verschlechtern, da in TSCHERNINGs Auge, wie aus seinen Zeichnungen hervorgeht, die Asymmetrienwerte negativ sind.

Im normalen Auge ist die Aberration innerhalb der positiven Zone auch bei kräftiger Akkommodation positiv, was dadurch konstatiert wird, daß man, wenn der leuchtende Punkt bis in die Nähe des Nahepunktes hineingerückt wird, bei der Fixation desselben immer zuerst die Schnittlinie der Brennfläche zu sehen bekommt, welche erst nach weiterer Anstrengung der Akkommodation der gewöhnlichen Sternfigur bzw. bei nicht dilatierter Pupille dem scharfen Bilde Platz macht. Die mathematische Untersuchung der Dioptrik der Kernlinse beweist eine akkommodative Abnahme des Wertes von p_n in einem solchen Grade, daß der Aberrationswert, wenn er bei der Akkommodation nur diesem Einflusse unterworfen wäre, auf ungefähr $^2/_3$ des ursprünglichen Wertes heruntersinken müßte. Durch die subjektive Stigmatoskopie gelingt es mir aber nicht, diese Veränderung auf einwandfreie Weise zu konstatieren, weil die begleitende Pupillenverengerung die Untersuchung ohne Mydriaticum vereitelt, und die Erscheinungen bei dilatierter Pupille — sei es durch Kokain, sei es durch Homatropin mit nachfolgender Eserineinträufelung — nicht eindeutig zu sein scheinen.

Die physiologische Bedeutung der auf diese Weise ermittelten Konstitution des im normalen Auge gebrochenen Strahlenbündels kann erst im Lichte der allgemeinen Gesetze der optischen Abbildung hinreichend gewürdigt werden. Die Größe der Zerstreuungskreise, welche durch die um einen leuchtenden Punkt sichtbaren Strahlen repräsentiert werden, würde nämlich eine optische Abbildung von der Güte, welche durch die Sehschärfe des normalen Auges bezeugt wird, vollkommen vereiteln, wenn die Zerstreuungskreise die denselben zugeschriebene Bedeutung für die Abbildung hätten. Da an Stelle derselben die Schnittlinien mit der kaustischen Fläche treten, so wird jeder Widerspruch zwischen dem Grade der Sehschärfe und dem Baue des Strahlenbündels von selbst gelöst. Es wird auch die klinisch konstatierte Fähigkeit, bei verschiedener optischer Einstellung bzw. bei verschiedenen Graden von angeborenem oder künstlichem Astigmatismus durch Übung die Sehschärfe beträchtlich zu heben, auf einwandfreie Weise erklärt. Denn solange noch Schnittlinien der kaustischen Fläche auf die Netzhaut fallen, handelt es sich stets immer noch um eine Abbildung, und die Anstrengung, welche das Auge beim Versuche, mit fehlerhafter Zylinderkorrektion zu lesen, verspürt, ist nur ein Ausdruck für die größere Schwierigkeit, Schnittlinien der kaustischen Fläche zu deuten, welche eine ungewöhnliche und für die maximale Schärfe weniger geeignete Form haben. Dies dürfte deshalb bei der Nahearbeit als um so anstrengender empfunden werden, als eben die Form der Schnittlinie der kaustischen Fläche zusammen mit der chromatischen Aberration das bei den stetigen Wechselungen der akkommodativen Einstellung regelnde Moment darstellen dürfte. Ein solches Moment kann eben nur darin bestehen, daß die Strahlenbündelquerschnitte auf der Netzhaut ein verschiedenes Aussehen haben, je nachdem die Akkommodation weiter gespannt oder erschlafft werden soll.

Für die Auffassung der Konstitution des im Auge bei den gewöhnlichen Fällen von Astigmatismus gebrochenen Strahlenbündels ist auch die Größe der Aberration von grundlegender Bedeutung, indem ein Astigmatismus von mehr als 4 Dioptrien dazu nötig ist, um zu bewirken, daß nicht Schnittlinien der

beiden kaustischen Flächen auf einmal auf die Netzhaut fallen, so daß in den praktisch wichtigsten Fällen von Astigmatismus die kaustischen Flächen den in der Fig. 121 S. 256 dargestellten Typus haben, und zwei Strahlen durch die mittelgroße Pupille gehen, längs welchen anastigmatische Brechung vorhanden ist. Die Querschnitte eines solchen Strahlenbündels sind in der Fig. 146 wiedergegeben, wobei jedoch die photographische Aufnahme[1] unter Anwendung einer Telekombination erfolgte und die verschiedenen Querschnitte durch Wechseln des Abstandes der Komponenten auf die Platte gebracht wurden, so daß die gegenseitigen Größenverhältnisse derselben nicht naturgetreu sind. Ähnlich sind die Erscheinungen im astigmatischen Auge, wovon man sich durch Vorsetzen von Zylindergläsern überzeugen kann. Der einzige Unterschied besteht in einer Zerklüftung der Zerstreuungsfiguren, welche von den „Faltenbildungen" der Wellenfläche herrührt. Was speziell das pfeilspitzenähnliche Aussehen betrifft, welches an zwei einander gegenüber liegenden Punkten in dem vierten Querschnitte der Fig. 146 sichtbar ist, und die beiden anastigmatischen Fokalpunkte angibt, so ist dasselbe bei der stigmatoskopischen Untersuchung des künstlich astigmatischen Auges leicht zu konstatieren. Bei abnormer vertikaler Asymmetrie und nicht zu hochgradigem Astigmatismus ist an der kaustischen Fläche immer ein solcher Punkt vorhanden, und an den von Tscherning gegebenen Zeichnungen der Querschnitte des in seinem Auge gebrochenen Strahlenbündels ist derselbe leicht zu erkennen. Der künstliche Astigmatismus bietet ein Mittel dar, um bei der stigmatoskopischen Messung der Aberration den Einfluß der Akkommodation zu eliminieren, worauf jedoch hier nicht näher eingegangen werden soll.

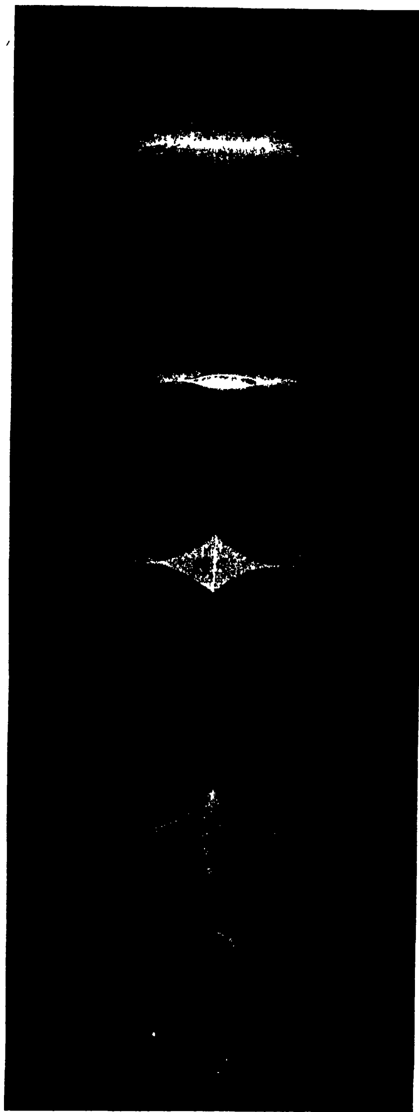


Fig. 146.

Von den übrigen Methoden, die Aberration des Auges zu untersuchen, steht diejenige, welche ich die objektive Stigmatoskopie nennen möchte, obenan.

[1] Ich verdanke dieselbe Herrn Cand. Phil. A. Odencrants.

Ersetzt man in der ophthalmometrischen Nernstlampe den Spalt durch ein feines Loch, und befestigt man vor diesem in einer Neigung von 45° ein vertikal gestelltes Deckgläschen von solcher Größe, daß kein Licht die Kanten desselben trifft, so bildet das im Deckgläschen entstehende Spiegelbild des im Loche sichtbaren Teiles des glühenden Stäbchens einen sehr hell leuchtenden Punkt, mit welchem der Untersucher seine Pupille zusammenfallen lassen kann. Wenn dann das gespiegelte Licht in die Pupille des in 30 bis 50 cm Abstand befindlichen, zu untersuchenden Auges geworfen wird, so kann man durch Verschieben seines Kopfes in verschiedenen Richtungen die Strahlenvereinigung untersuchen. Wenn es sich um ein Auge handelt, welches bei dieser Versuchsanordnung das Spiegelbild des leuchtenden Punktes scharf fixieren kann, so entsteht bei der Fixation ein Bild auf der Netzhaut, welches bei der diffusen Reflexion wegen der Lichtverteilung in demselben binnen gewisser Grenzen als ein punktförmiges angesehen werden kann, und welches die Lichtquelle desjenigen Strahlenbündels darstellt, in welchem die Strahlenvereinigung untersucht wird. Besonders im Abstande von 50 cm haben die Querschnitte des Strahlenbündels eine solche Größe, daß die Pupillengröße des Untersuchers vollkommen bedeutungslos ist. Bei richtiger Zentrierung seines Auges sieht man im Zentrum der im verdunkelten Zimmer gewöhnlich mittelgroßen Pupille einen hell leuchtenden Punkt, um den herum man sogar in vielen Fällen die Strahlenfigur wahrnehmen kann. Dieser wegen der Helligkeit mehr gelblich erscheinende Punkt ist von einer dunkleren und deshalb mehr rötlich aussehenden Zone umgeben, welche wiederum nach außen von einem helleren gelblicheren Ring umgeben ist. Je nach der Pupillengröße erstreckt sich diese helle ringförmige Zone bis zum Rand der Pupille oder wird wiederum von einer dunkleren, rötlicheren Zone umgeben. Verschiebt man nun sein Auge z. B. in horizontaler Richtung, so macht der zentrale helle Punkt eine gleichsinnige Bewegung in der Pupille des untersuchten Auges, während die vertikalen Teile der ringförmigen hellen Zone sich in entgegengesetzter Richtung verschieben. Es beweist dies, daß längs dem zentralen Strahl die Strahlenvereinigung hinter der Pupille des untersuchenden Auges zustande kommt, während die Strahlen, welche die Pupille des untersuchten Auges dort schneiden, wo der helle Ring sichtbar ist, vor der Pupille des Untersuchers von nächstliegenden Strahlen geschnitten werden, oder mit anderen Worten, daß die Aberration positiv ist, und daß beim scharfen Fixieren eines leuchtenden Punktes ein vor der Spitze der kaustischen Fläche belegener Strahlenbündelquerschnitt auf der Netzhaut des untersuchten Auges eingestellt wird. Von diesem Verhalten habe ich unter physiologischen Verhältnissen bisher keine Ausnahme gefunden. Diese Methode ist außer der subjektiven Stigmatoskopie die einzige, welche es gestattet, die Aberration innerhalb der optischen Zone zu untersuchen. Zur Darstellung der Brennflächenkante kann sie jedoch nicht angewendet werden, weil das auf der Netzhaut entstandene Bild nicht die hierzu erforderliche Güte der Strahlenvereinigung zeigt. Zur objektiven Untersuchung der Refraktion und des Astigmatismus sowie der pathologischen Formen von Asymmetrie und Aberration eignet sie sich vor jeder anderen. Auf die Details dieser Untersuchungen hier einzugehen, würde jedoch zu weit führen. Die Methode kann als eine verfeinerte skiaskopische bezeichnet werden, leistet aber viel mehr als diese, da die Refraktion in der Fovea selbst untersucht wird, und da betreffs der Asymmetrie und Aberration bei der skiaskopischen Methode die Größe der Licht-

quelle, der Abstand der Pupille des Untersuchers von dem Ort des Spiegelbildes derselben und das Loch des Spiegels ebenso viele Fehlerquellen darstellen, welche die Erscheinungen undeutlicher machen und die Exaktheit der aus denselben gezogenen Schlüsse beeinträchtigen. Was die Untersuchungsergebnisse betrifft, ist demnach die Methode der objektiven Stigmatoskopie streng von der der Skiaskopie zu trennen, obwohl mit Hinsicht auf die Technik letztere als eine weniger exakte Variation ersterer angesehen werden kann. Diese erfordert aber unbedingt einen dünnen, nicht foliierten Spiegel und eine spezifische Helligkeit, wie sie nur durch die Nernstlampe oder durch die elektrische Bogenlampe erhalten werden kann.

In Fällen von abnormer Asymmetrie oder negativer peripherer Totalaberration, welche letztere nicht selten die Starbildung einleitet, kann man ohne Schwierigkeit die verschiedene Refraktion des Auges längs den verschiedenen, durch die Pupille gehenden Strahlen mittels der Refraktionsbestimmung im aufrechten ophthalmoskopischen Bilde konstatieren. Hierbei muß aber immer auf ein kleines Gefäß geachtet werden, welches senkrecht zu dem Meridianschnitt verläuft, in welchem die Variation der Refraktion untersucht wird, und das Loch des Augenspiegels darf keinen größeren Durchmesser als 1,5 bis 2 mm haben. Bei der Bestimmung der Refraktion durch verschiedene Teile der Pupille hindurch hat man außerdem darauf acht zu geben, daß keine Verschiebung des Loches zur eigenen Pupille stattfindet. Auch kann der entstehende Astigmatismus und die durch denselben verursachte Formveränderung der Papille demselben Zwecke dienen. Da nämlich immer bei der Veränderung der Refraktion der radiäre Hauptschnitt einer größeren Veränderung der Brechkraft unterworfen ist, so gilt die Regel, daß, wenn bei einer Verschiebung des Spiegels zur Pupille des untersuchten Auges die Papille in der Richtung der Verschiebung relativ mehr ausgedehnt erscheint, eine Zunahme der Brechkraft konstatiert worden ist und umgekehrt. Zwar gelingt es nicht immer, die physiologische Aberration mit diesen Methoden nachzuweisen, was sicher darauf beruht, daß die Stelle der größten Brechkraft so wenig vom Zentrum entfernt ist, und daß die transversale Asymmetrie, welche an dieser Stelle nicht wie die direkte verschwindet, Unschärfe verursacht. Dagegen gelingt es oft zu konstatieren, daß diese Unschärfe bei Dezentration des Spiegelloches zuerst zunimmt, um dann wieder abzunehmen, wie es die Konstitution des gebrochenen Strahlenbündels fordert, und kann man bei gut dilatierter Pupille sehr oft die der positiven Aberration eigentümliche relative Ausdehnung des zur Verschiebungsrichtung parallelen Papillendurchmessers sehen.

Andere Untersuchungsmethoden basieren auf dem Scheinerschen Versuche, welcher dem Optometer von Young und dem Aberroskop von Tscherning zugrunde liegt. Wegen der Rolle, welche die mit dem zuletztgenannten Instrumente erhaltenen Resultate in den Ausführungen Tschernings spielen, dürfte es angezeigt sein, hier etwas näher auf dasselbe einzugehen. Das Instrument besteht aus einem quadratischen, auf der ebenen Fläche einer plankonvexen Linse eingeritzten, möglichst undurchsichtigen Liniennetze und wird in einem Abstande von 10 bis 20 cm vor dem Auge in der Richtung nach einem leuchtenden Punkte gehalten. In dem durch die artefizielle Myopie bedingten Zerstreuungskreis des leuchtenden Punktes sieht man die Schatten der undurchsichtigen Linien. Nach der Meinung von Tscherning sollte eine nach dem Zentrum zu konkave bzw. konvexe Krümmung eine positive bzw.

negative Aberration des im Auge gebrochenen Strahlenbündels beweisen. Wie ersichtlich, handelt es sich aber um ein optisches Projektionsphänomen. Dasselbe beruht, wie ich bewiesen habe, nur zum Teil auf der Aberration, zum Teil aber auf einer anderen Größe, welche im lebenden Auge nicht berechnet werden kann, und die Aberration, auf welcher die Krümmung der sichtbaren Linien beruht, ist nicht diejenige, welche das zum Sehen angewendete Strahlenbündel charakterisiert, sondern die, mit welcher das beim Versuche in das Auge fallende Strahlenbündel nach der Brechung behaftet ist, was von um so größerer Bedeutung ist, als die Aberration allgemein mit der Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels wechselt.

Auf folgende Weise habe ich das Verständnis der mathematischen Unmöglichkeit der Ansicht Tscherning s über die Bedeutung der mit dem Aberroskop beobachteten Erscheinungen allgemein zugänglich gemacht. Wenn man sich an das reduzierte Auge hält und das durch die Linse des Aberroskopes gebrochene Strahlenbündel als aberrationsfrei ansieht, so bilden die Schatten auf der brechenden Fläche einfachgekrümmte Linien, welche in Ebenen liegen, die sich in dem durch die Konvexlinse entworfenen Bilde des leuchtenden Punktes schneiden. Damit aber die Schattenlinien auf der Netzhaut gerade wären, müßten sich diese Ebenen, sobald keine Aberration vorliegt, in dem im Auge entworfenen Bilde des leuchtenden Punktes schneiden, was unmöglich ist, wenn nicht der Bildpunkt nach der Brechung in der Aberroskoplinse mit dem Krümmungsmittelpunkte der brechenden Fläche des reduzierten Auges zusammenfällt.

Das exakte Ergebnis der Untersuchung mit dem Aberroskop ist, wenn das Auge als ein Umdrehungssystem angesehen wird, das Vorzeichen des Distorsionswertes bei der optischen Projektion. Dieses ist zwar, wenn keine brechende Fläche zwischen dem zu projizierenden Liniennetze und dem Schirme — Aberroskoplinien bzw. Netzhaut — liegt, nur vom Vorzeichen der Aberration im Objektstrahlenbündel abhängig, und es würde demnach gegen die aus den Untersuchungen mit dem Aberroskope gezogenen Schlüsse nichts einzuwenden sein, wenn das Instrument im Glaskörper läge. Sowie aber eine brechende Fläche zwischen Liniennetz und Schirm liegt, kommt ein anderer Faktor hinzu, welcher im optischen System des Auges nicht berechnet werden kann, da die betreffenden Gesetze in heterogenen Medien unbekannt bleiben, welche aber von der Entfernung des Liniennetzes und bei größerer Entfernung auch merkbar von der Aberration der Aberroskoplinse beeinflußt wird. Von den zwei Gliedern, welche zusammen den Distorsionswert geben, dessen Vorzeichen durch die aberroskopische Untersuchung erhalten wird, wechselt das von der Aberration abhängige sein Vorzeichen, wenn das Bild des leuchtenden Punktes hinter die Netzhaut verlegt wird, das andere aber nicht, weshalb das Vorzeichen der Aberration des im Auge gebrochenen Strahlenbündels durch die Untersuchung mit dem Aberroskop gefunden werden kann, sobald die Krümmung der Schattenlinien das Vorzeichen wechselt, je nachdem das Bild des leuchtenden Punktes vor oder hinter die Netzhaut fällt. Dies ist nun in der Tat im normalen Auge die Regel, so daß man auf diese, nicht aber auf die von Tscherning angegebene Weise die normale positive Aberration des Auges konstatieren kann. Dagegen ist das Aberroskop in keiner Weise, ebensowenig wie Young s Optometer, hinreichend empfindlich, um die tatsächliche komplizierte Form der kaustischen Fläche hervortreten zu lassen, indem überhaupt kein Schluß

aus der Krümmung der in den peripheren Teilen des Zerstreuungskreises sichtbaren Schattenlinien gezogen werden kann. Zur Diagnose der abnormen Asymmetrie dürfte es überaus geeignet sein, da es das Vorzeichen der transversalen Asymmetrie angibt, sobald das Vorzeichen der Krümmung der zentralen Schattenlinie unverändert dasselbe bleibt, wenn das Bild des leuchtenden Punktes vor oder hinter die Netzhaut fällt.

Die von Tscherning behauptete Änderung des Vorzeichens der Aberration während der Akkommodation ist durch Untersuchungen mit dem Aberroskop bisher nicht bewiesen worden. Zwar kann man, wie ich selbst konstatiert habe, beobachten, daß die Krümmung der Schattenlinien während der Akkommodation abnimmt. Eine solche Veränderung muß aber teils durch die Verschiebung des vor der Netzhaut liegenden Bildes des leuchtenden Punktes eintreten, und kann teils auch durch die Veränderung der nicht von dem Aberrationswerte abhängigen Komponente des Distorsionswertes zustande kommen. Dazu, daß eine Veränderung der Aberration während der Akkommodation konstatiert werde, ist es unumgänglich nötig, daß man zuerst bei emmetropischer Refraktion, die nötigenfalls durch Korrektion zu erzielen ist, auf oben angegebene Weise die positive Aberration konstatiere, dann bei Vorsetzen von immer stärkeren Konkavgläsern, bzw. bei entsprechender Änderung der früheren Korrektion akkommodieren lasse, wobei das Aberroskop unmittelbar vor das Korrektionsglas gehalten wird. Erst wenn bei der Akkommodation mit dieser Versuchsanordnung successive zuerst nach dem Zentrum zu konvexe Schattenlinien, dann der Lichtpunkt und schließlich entgegengesetzt gekrümmte Schattenlinien sichtbar würden — alles mit einer und derselben Korrektion und ohne Änderung des Abstandes des Aberroskopes vom Auge —, erst dann wäre durch die Untersuchung mit dem Aberroskop bewiesen, daß die normale positive Aberration während der Akkommodation negativ wird. Ein solcher Beweis ist aber trotz der Publikation der nötigen Versuchsanordnung[1] nicht erbracht worden.

Auch durch einen Versuch mit dem leuchtenden Punkte glaubt Tscherning eine Änderung des Vorzeichens der Aberration während der Akkommodation bewiesen zu haben, indem er das Aussehen des Zerstreuungskreises vergleicht, je nachdem das Auge durch Akkommodation bzw. durch eine entsprechende Konvexbrille myopisch gemacht wird, und im ersteren Falle eine zur Begrenzungslinie parallele, periphere, helle Linie findet. Zufolge der durch die „Faltenbildungen“ bedingten Beschaffenheit der kaustischen Fläche ist es aber mathematisch unmöglich, daß eine negative Aberration einen Zerstreuungskreis von dem von Tscherning gezeichneten Aussehen verursachen könnte, sondern es müßte eine zackige Schnittlinie der kaustischen Fläche auf dieselbe Weise hinter dem axialen Fokalpunkte gefunden werden, wie sie im nicht akkommodierenden Auge vor diesem Punkte vorhanden ist, was unter anderem schon aus dem Aussehen des bei dilatierter Pupille sichtbaren umgebogenen Teiles der kaustischen Fläche hervorgeht. Dagegen kann man, wie oben erwähnt wurde, durch Nachahmen nicht nur der akkommodativen Refraktionsänderung, sondern auch der begleitenden Pupillenkontraktion, indem die Konvexlinse mit einem entsprechend kleinen Loche kombiniert wird, dasselbe Aussehen der Zerstreuungskreise erhalten wie bei der Akkommodation. Dem mit den Erscheinungen der Diffraktion Vertrauten ist es sofort durch die zwischen der

---

[1] a. a. O. Arch. f. Ophth. LIII, 2. 1901. S. 239.

Begrenzungslinie und der hellen Zone sichtbare, dunklere Linie klar, daß es sich eben um eine Diffraktionserscheinung handelt. Dieser Versuch dürfte dasselbe in allgemein verständlicher Weise illustrieren. Wie oben dargelegt wurde, ergibt die subjektive Stigmatoskopie, als wissenschaftliche Methode angewendet, eine positive Aberration innerhalb der optischen Zone auch bei kräftigster Akkommodation. Es folgt hieraus, daß die akkommodative Pupillenverengerung nicht den Zweck haben kann, die Wirkung der Aberration zu verringern, da diese schon bei Akkommodationsruhe unschädlich ist, bei der Akkommodation aber ohnehin abnimmt.

Die skiaskopische Untersuchung lehrt, daß in manchen Fällen eine Änderung des Vorzeichens der peripheren Totalaberration bei der Akkommodation eintritt. Obwohl dieses Ergebnis wegen der der skiaskopischen Untersuchung anhaftenden Fehlerquellen nicht als einwandfrei bezeichnet werden darf, so scheint es doch, wenn es bestätigt wird, ein Ausdruck für die durch die akkommodative Formveränderung der Kernlinse resultierende Änderung der Aberration zu sein, indem dieselbe wahrscheinlich von entsprechenden Änderungen der Differentialquotienten höherer Ordnung der Indizialgleichung begleitet sein muß, welche die periphere Totalaberration beeinflussen.

Da bei der Akkommodation die Asymmetrienwerte längs der Visierlinie und somit auch die Neigung des zentralen Strahles zur Visierlinie geändert werden können, obwohl sich diese Änderung nicht berechnen läßt, und da der zentrale Strahl allein für die Richtung der Augenachse maßgebend ist, indem derselbe bei Berücksichtigung der monochromatischen Aberrationen die Rolle spielt, welche, wenn dieselben außer acht gelassen werden, der Visierlinie zukommt, so ist es einleuchtend, daß hierdurch eine akkommodative Richtungsänderung der Augenachse — wie sie tatsächlich beobachtet wird — verursacht werden kann.

Die Worte Helmholtz', daß die im Auge vorkommenden monochromatischen Aberrationen von einer Art sind, wie sie bei gut gearbeiteten optischen Instrumenten nicht vorkommen darf, verleiten einerseits zu der Annahme, das Auge sei ein schlecht gebautes optisches Instrument — was Helmholtz nicht gesagt und ganz sicher auch nicht gemeint hat —, fordern aber anderseits zu der Untersuchung auf, ob diese Aberrationen zweckdienlich seien, und welchem Zwecke dieselben wohl dienen mögen. Zunächst ist dabei zu berücksichtigen, daß, wie Helmholtz hervorgehoben hat, der physikalischen Bildschärfe durch die Diffraktion eine Grenze gesetzt ist.

Die Beugungserscheinungen des Lichtes bieten äußerst komplizierte mathematische Probleme dar, welche nur in speziellen Fällen mit hinreichender Exaktheit gelöst worden sind. Hierher gehören die sogenannten Fraunhoferschen Beugungserscheinungen beim Durchgange des Lichtes durch eine runde Öffnung, bei welchen vorausgesetzt wird, daß sowohl Lichtquelle wie Schirmebene unendlich weit von der Öffnung entfernt sind. Letztere Bedingung wird dadurch erfüllt, daß hinter derselben ein optisches System aufgestellt wird, dessen Brennebene als Schirmebene dient. Ein leuchtender Punkt wird unter diesen Bedingungen als eine helle von abwechselnd hellen und dunklen Ringen umgebene Scheibe abgebildet. Die Grenze der zentralen hellen Scheibe, in welcher die Helligkeit nach dem Rande zu abnimmt, liegt am ersten, durch den kleinsten dunklen Ring repräsentierten Lichtminimum. Wird der Winkelabstand dieses Minimums von der Achse mit φ bezeichnet, so ist

$$\sin\varphi = 1{,}22\,\frac{\lambda}{2R},$$

wo λ die Wellenlänge, R den Radius der Öffnung darstellt. Bei der Kleinheit des Winkels ist derselbe mit hinreichender Genauigkeit dem Sinus proportional, und hat man somit, wenn φ in Minuten gerechnet wird,

$$\varphi = \frac{1{,}22}{R}\cdot\frac{\lambda}{0{,}00058},$$

welcher Ausdruck für Licht von der Wellenlänge 0,00058 mm die Form

$$\varphi = \frac{1{,}22'}{R}$$

annimmt, wo R in Millimetern zu rechnen ist. Die Winkelausdehnung der in die unendlich ferne Objektebene projizierten zentralen hellen Scheibe ist nach dem oben Gesagten gleich 2φ. Wegen der nach dem Rande zu abnehmenden Helligkeit derselben ist es aber, damit zwei Punkte getrennt sichtbar seien, nicht nötig, daß dieselben um diese Winkeldistanz voneinander abstehen, sondern man sieht schätzungsweise die Hälfte für genügend an und läßt konventionell den Winkel φ das Auflösungsvermögen des Instrumentes bezeichnen. Die Strahlenbrechung in dem hinter der Öffnung befindlichen optischen Instrumente mag beliebig verbessert, das in der Brennebene entworfene Bild beliebig vergrößert werden, die Grenze der Leistung wird doch von dem davon unabhängigen Auflösungsvermögen bestimmt.

Diese Berechnung ist ohne weiteres auf alle für unendliche Ferne eingestellten optischen Systeme anwendbar, wenn die Blende vor der vordersten brechenden Fläche liegt oder mit der Fassung derselben zusammenfällt, gilt somit auch für das reduzierte Auge, wo die Pupille mit der brechenden Fläche zusammenfällt. Im menschlichen Auge, wo die Pupille hinter der Hornhaut liegt, kann man nur dadurch einen approximativen Wert des Auflösungsvermögens erhalten, daß in die Formel der Radius der vor dem Auge liegenden Eintrittspupille eingesetzt wird, wobei ohne weiteres verständlich ist, daß λ die Wellenlänge in Luft angibt, und daß der Brechungsindex von Kammerwasser und Glaskörper ohne Einfluß ist, da ja eine objektseitige Projektion dem Werte von φ zugrunde liegt Dies wird auch richtig von Schuster[1] und Gleichen[2] angegeben, während sowohl Drude[3] wie Pockels[4] der Berechnung die Wellenlänge in Kammerwasser und Glaskörper zugrunde legen. Letzterer rechnet mit Licht von der Wellenlänge 0,00057 mm, wobei $2\varphi = \frac{1}{R}\cdot 144''$ wird. Die S. 168 von Helmholtz angegebene Formel ist für das reduzierte Auge gültig, und man hat nur in derselben

$$2\varphi \quad \lambda \quad 2R \quad \text{für bzw.} \quad \frac{n\delta}{r} \quad nl \quad d$$

einzusetzen, um die oben angegebene zu erhalten. Da die Formel nicht die objektseitige Winkelgröße der scheinbaren hellen Fläche, sondern die Größe derselben auf der Netzhaut angibt, muß dieselbe den Brechungsindex enthalten,

---

[1] Arthur Schuster. *An introduction to the theory of optics.* London 1904.
[2] A. Gleichen, Einführung in die medizinische Optik. Leipzig 1904.
[3] Paul Drude, Lehrbuch der Optik. Leipzig 1906.
[4] A. Winkelmann, Handbuch der Physik. 2. Aufl. 6. Bd. Leipzig 1906. S. 1075.

was durch Anwendung der Wellenlänge im brechenden Medium stattfindet. Helmholtz hat zwar nun die Scheibengröße auf der Netzhaut unter Anwendung von $\lambda = l$ statt $\lambda = n\,l$ berechnet, dafür hat er aber bei der Berechnung der objektseitigen Winkelgröße, wie aus den Zahlen hervorgeht, $2\,\varphi = \frac{\delta}{r}$ statt $2\,\varphi = \frac{n\,\delta}{r}$ gesetzt, so daß das Endresultat der Rechnung richtig ist und offenbar nur ein Versehen beim Niederschreiben der Rechnung vorgelegen hat. Zu dem Resultate von Drude und Pockels gelangt man, wenn man in der Formel von Helmholtz die Wellenlänge des Lichtes im brechenden Medium einführt, ohne zu berücksichtigen, daß bei der objektseitigen Projektion des Netzhautbildes der hellen Scheibe der Brechungsindex wieder angewendet werden muß.

Für das Auflösungsvermögen des Auges ist somit die allgemeine Formel anzuwenden. Dieselbe ergibt bei einer Eintrittspupille von 2 mm Durchmesser für gelbes Licht von der Wellenlänge 0,00058 mm einen Winkel von 1,22 Minuten, für blaugrünes Licht von der Wellenlänge 0,0005 mm 1,05 Minuten, während ein ferner leuchtender Punkt die doppelte scheinbare Winkelgröße hat. Der das Auflösungsvermögen angebende Winkel ist der Wellenlänge direkt, dem Durchmesser der Eintrittspupille umgekehrt proportional. Bei einer Eintrittspupille von 3 mm Durchmesser ist derselbe somit 0,82 bzw. 0,7 Minuten. Wegen der Lichtverteilung im Sonnenspektrum und noch mehr in den Spektren der künstlichen Lichtquellen ist erstere Zahl die für einen Vergleich mit der Sehschärfe des Auges anwendbarere. Zieht man bei diesem Vergleich in Betracht, daß wegen der konventionellen Definition des Auflösungsvermögens dieses eher durch ein zu kleines als durch ein zu großes Winkelmaß angegeben wird, so gelangt man zu dem Resultat, daß die durch die Diffraktion gesetzte Grenze der Leistungsfähigkeit des Auges, soweit dieselbe berechnet werden kann, bei der einer guten Beleuchtung entsprechenden Pupillengröße von der Sehschärfe des normalen Auges erreicht wird.

Hieraus folgt wiederum, daß die vorhandenen komplizierten Aberrationen höherer Ordnung sowie die erstaunlich große positive Aberration innerhalb der optischen Zone die Schärfe des Sehens bei der betreffenden Pupillengröße nicht beeinträchtigen. Die Dioptrik der Kristallinse hat aber gelehrt, daß erstere Aberration ausschließlich, letztere zum großen Teil davon herrühren, daß die Linse aus einem heterogenen Medium besteht. Der große Vorteil eines solchen Mediums ist die bei der Akkommodation eintretende Erhöhung des Totalindex, welche eine im Verhältnis zur Formveränderung disproportionierlich große und bei homogenen Medien caeteris paribus unerreichbare Änderung der optischen Einstellung bezeichnet. Da somit die monochromatischen Aberrationen die zum Erreichen dieses Vorteiles notwendige Verschlechterung der Strahlenvereinigung darstellen, durch diese Verschlechterung aber die Bildschärfe bei guter Beleuchtung nicht unterhalb der durch die Diffraktion gesetzten Grenze der Leistungsfähigkeit des Auges herabgedrückt worden ist, so sind auch die monochromatischen Aberrationen ein Zeugnis der Vollkommenheit, wenn in einem optischen Instrumente diese überhaupt darin gesehen wird, daß die Strahlenvereinigung eben die Güte hat, welche zur Erreichung der größten ausnutzbaren Bildschärfe erforderlich ist, eine überschüssige Güte derselben aber zugunsten eines anderen Zweckes geopfert wird.

572